В. А. ПАВЛОВ

# гироскопический эффект
## его проявления и использование

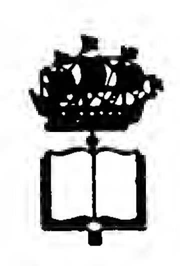


В. А. ПАВЛОВ

# гироскопический эффект, его проявления и использование

•

Издание пятое,
переработанное и дополненное



ЛЕНИНГРАД · «СУДОСТРОЕНИЕ» · 1985

ББК 39.471.5
П 12
УДК 531.383(023)

Рецензент А. П. Ляликов

**Павлов В. А.**

П 12 Гироскопический эффект, его проявления и использование. 5-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1985. — 176 с., ил.

ИСБН

Книга заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук проф. В. А. Павлова в популярной форме знакомит читателя с физической природой гироскопических явлений, наблюдаемых у быстро вращающихся и колеблющихся тел. На многочисленных примерах проиллюстрировано влияние воздействия гироскопического эффекта на живые организмы. Пятое издание (4-е вышло в 1978 г.) дополнено новыми примерами практического использования гироскопа в различных областях науки и техники.

Книга вполне доступна читателю, знакомому с элементарными основами механики. Она предназначена для учащейся молодежи средних школ, производственно-технических училищ и техникумов, может быть полезна рабочим приборостроительной промышленности и студентам соответствующих специальностей.

**П $\frac{3605030000-054}{048(01)-85}$ 33—85** **39.471.5**



**Всеволод Александрович Павлов**

**ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ, ЕГО ПРОЯВЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ**

Заведующий редакцией А. Д. СТАРКОВ. Редакторы А. А. ИВАНОВСКАЯ, Ю. В. ПОПОВ. Художественный редактор О. П. АНДРЕЕВ. Технический редактор И. К. ПЕЛИПЕНКО. Корректоры Н. Н. КУЗНЕЦОВА, В. Ю. САМОХИНА. Художник Б. Н. ОСЕНЧАКОВ.

ИБ № 1090

Сдано в набор 27.02.85. Подписано в печать 17.07.85. М-26530. Формат 60X90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 11,0. Усл. кр.-отт. 11.38. Уч.-изд. л 10,6. Тираж 5700 экз. Изд. 3970—84. Заказ № 514. Цена 30 к.

Издательство «Судостроение», 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8.

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 198052, г. Ленинград, Измайловский проспект, 29.

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Свойство быстровращающихся тел сохранять ось своего вращения неподвижной в пространстве, обнаруженное человеком еще на заре своего развития, всегда вызывало восхищенное изумление. Проходили века, одни эпохи сменялись другими, а интерес людей к поведению вращающихся тел, известных как волчки, неуклонно возрастал. Во всех уголках земного шара местные умельцы мастерили их из подсобных материалов, придавая своим изделиям разнообразные формы и размеры.

Если вращающийся волчок первоначально вызывал у наших древних предков лишь удивление, то со временем люди начали его использовать в своих играх, при исполнении ритуальных танцев, в спортивных упражнениях и даже в домашнем обиходе. Результаты археологических раскопок, проведенных в последние десятилетия в Великом Новгороде, одном из древнейших городов нашей Родины, показывают, что северные славяне уже в X веке нашей эры использовали волчки в практических целях.

В конце XIX — начале XX столетий интерес к использованию волчков резко возрос. Создаются первые так называемые *гироскопические приборы*, основным элементом которых являлся вращающийся волчок. В нашей стране гироскопическое приборостроение стало быстро развиваться после Великой Октябрьской революции. Применение гироскопов в современной технике особенно выросло в последние десятилетия в связи с успехами Советского Союза в освоении космического пространства, морских глубин и, в частности, с достижением по морю Северного географического полюса Земли.

Гироскопические устройства являются в настоящее время основными элементами систем управления морскими судами, самолетами, космическими кораблями, планетоходами

и другими подвижными объектами. Гироскоп помог уменьшить качку судна при волнении на море и автомобиля при езде по неровной дороге. Использование гироскопического эффекта обеспечивает устойчивое движение велосипедов, мотоциклов и мотороллеров, позволило осуществить проект монорельсовой железной дороги, создать двухколесный автомобиль и даже одноколесный мотоцикл. Гироскопические стабилизаторы биноклей, фотоаппаратов и кинокамер дают возможность наблюдать за удаленными предметами и фотографировать их даже при установке аппаратуры на колеблющихся в процессе движения платформах.

Многообразие возможностей практического использования гироскопов для решения самых разнообразных народнохозяйственных задач привлекает к ним всевозрастающее внимание советских людей и особенно нашей любознательной молодежи. Рассказать им о природе гироскопического эффекта, о его проявлениях в повседневной жизни и использовании в технике, а также о перспективах дальнейшего развития гироскопических устройств и является целью настоящей книги. Изданная впервые в 1961 году, она за сравнительно короткий срок выдержала четыре издания. Настоящее — пятое — издание дополнено примерами, позволяющими получить представление о новых областях применения и методах использования гироскопического эффекта.

Автор приносит благодарность М. И. Павлову за помощь в подготовке рисунков и выражает глубокую признательность читателям за их письма, содержащие ценные замечания и советы, направленные на улучшение книги. Все пожелания также будут приняты с искренней благодарностью. Отзывы о книге просьба направлять в издательство «Судостроение» по адресу: 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8.

# ВВЕДЕНИЕ

Вращающиеся волчки своим изумительным поведением во все времена привлекали внимание людей. Те, кто наблюдали их впервые, поражались тому, что волчок, который в отсутствие вращения не мог стоять на плоской поверхности и неизбежно заваливался на бок (рис. 1, *а*), будучи раскрученным, приобретал удивительную устойчивость и долгое время вращался вокруг оси *ОА* (рис. 1, *б*).

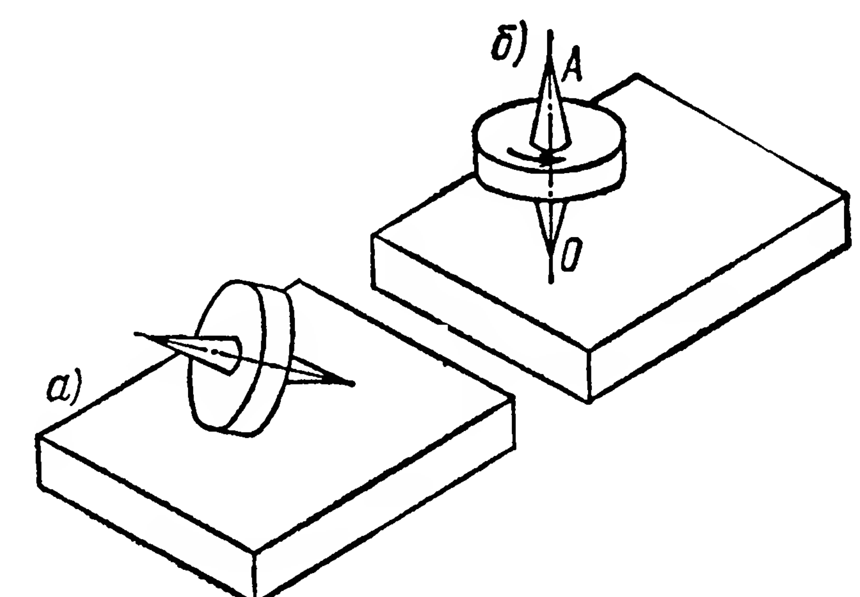



Рис. 1. Устойчивость волчка отсутствует при отсутствии вращения (*а*) и обеспечивается вращением вокруг вертикальной оси (*б*)

С волчками знакомы народы Европы и Азии, Африки и Америки, Австралии и самых малых островов, затерянных среди безбрежных океанских просторов. В каждой местности они отличались своеобразием форм и размеров. Изготовляли их, как правило, из наиболее доступных материалов. В России волчки вытачивали из дерева, придавая им разнообразные формы (рис. 2). Называли их по-разному: где вертушкой, где кружилкой, а также точкой, кубарем, юлой, дзыгой [34]. В Белоруссии встречались волчки, вырезанные из картофеля, репы и даже луковицы [40]. В Грузии волчки, называемые шуко, мастерили не только из дерева, но и из орехов [42]. В Индонезии материалом для изготовления волчков служили глина, перемешанная с конским волосом, и стволы бамбука, в Австралии — раковины улиток, а на Филиппинах — плоды кокосовых деревьев [12].

Для приведения волчка во вращение на его ножку наматывали тонкую бечеву. Затем, слегка придерживая волчок в месте опоры так, чтобы его ось оставалась вертикальной, резко сдергивали намотанную бечеву, приводя тем самым волчок во вращение вокруг оси *OA* (см. рис. 1, *б*). Сообщенное таким образом вращение продолжалось до тех пор, пока силы трения в точке *O*

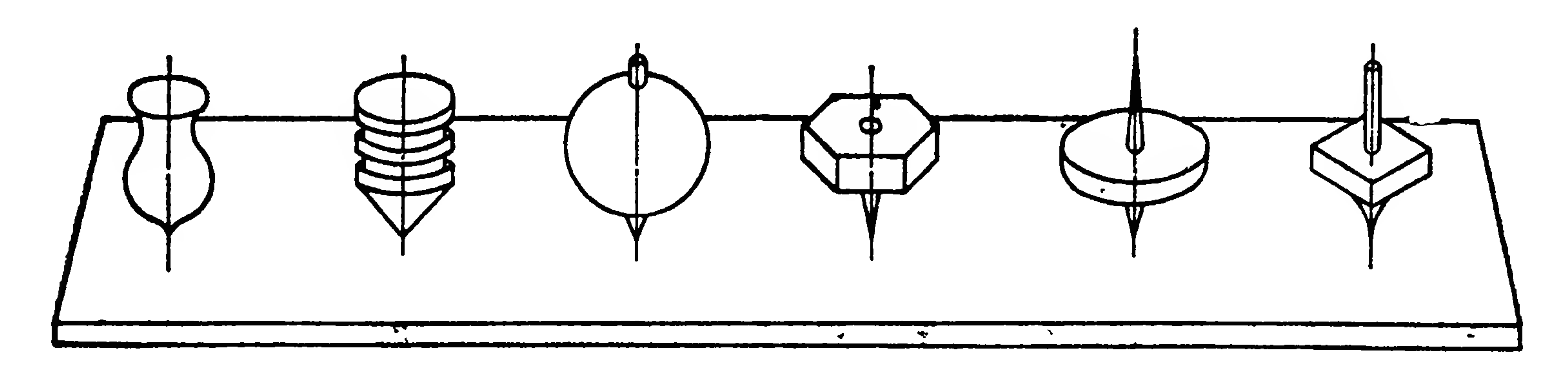


Рис. 2. Известные формы старинных русских деревянных волчков

опоры волчка не тормозили его движение. Для того чтобы продлить вращение, волчок периодически искусно подстегивали кнутиком, восстанавливая тем самым потерянную скорость.

Вращающийся волчок приобретает удивительные свойства. В отличие от неподвижного он не только не сваливается на бок, но даже оказывает противодействие попыткам изменить направление оси его вращения (рис. 3). Под воздействием толчка, направленного по стрелке *F* (перпендикулярно оси *OA*) вращаю-

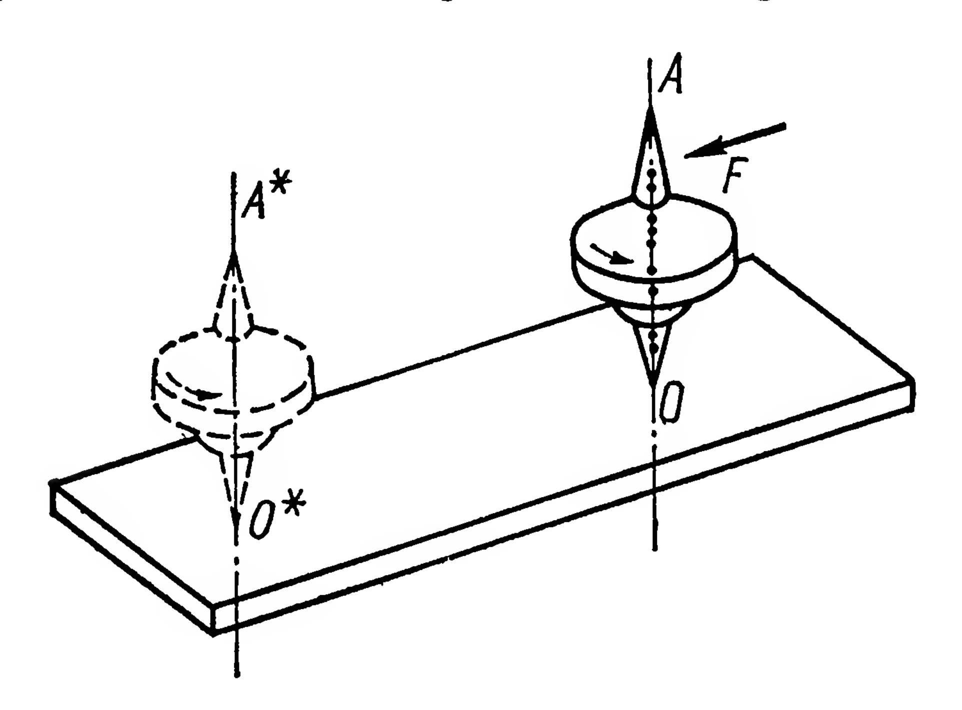



Рис. 3. Перемещение вращающегося волчка под действием внешней силы

щийся волчок лишь отскакивает в сторону, продолжая вращаться вокруг оси $O^*A^*$, параллельной *OA*.

Очевидно, что первыми на удивительные свойства вращающегося волчка обратили внимание отличающиеся любознательностью дети, и волчок во многих уголках земли стал одной из любимейших детских игрушек.

С течением времени конструкции волчков усложнялись. Их движение приобретало более сложный характер и часто сопровождалось звуками, напоминающими художественный свист [46]. В Японии существуют десятки разновидностей волчка. Некоторые из них выполнены очень искусно [50]. В специальных играх волчки спускаются с гор, танцуют на канате, разлетаются

на части, которые продолжают самостоятельно вращаться, совершая замысловатые фигуры. Продолжительное вращение волчка, называемого в Японии кома, обеспечивалось введением в его конструкцию массивного металлического обода.

На рубеже нашей эры волчок прочно входит в быт народов земного шара. Гироскопический эффект начинают использовать не только при создании игрушек, но также при выполнении



Рис. 4. Юрацкий волчок

спортивных упражнений и цирковых номеров, постановке балетных танцев и даже в азартных играх. В некоторых местностях нашей страны волчок служил своеобразным светильником. Так, у юраков, живущих по берегам нижнего течения рек Енисей и Таз, существовали деревянные волчки [29], острая ножка которых постепенно переходила в рюмочку с отверстием на ее боковой поверхности (рис. 4). Внутрь рюмочки из чумового костра бросали уголек. При вращении волчка воздух, проходя через боковое отверстие рюмочки, обдувал находящийся в ней уголек, который при этом ярко разгорался. Вращаясь вместе с волчком, светящийся уголек вычерчивал в полутемном чуме причуд-

ливые узоры, наблюдение за которыми помогало людям коротать в те давние времена долгие полярные ночи.

Первые попытки практически использовать волчки были предприняты славянами еще в X столетии. Раскопки в Великом Новгороде показали [20], что новгородцы уже в те давние годы изготовляли партии деревянных волчков, одинаковых по своим размерам и форме. Так, в Неревском раскопе (1951—1970), в котором вскрывались пласты земли, относящиеся к периоду X—XV веков, было найдено более 450 волчков, почти одинаковых по форме и по размерам (рис. 5). Их диаметр $d$ колебался в пределах от 4 до 5 см, а высота $h$ — от 5 до 6 см.

Однако практическое использование замечательных свойств вращающегося волчка в то время было еще весьма ограничено

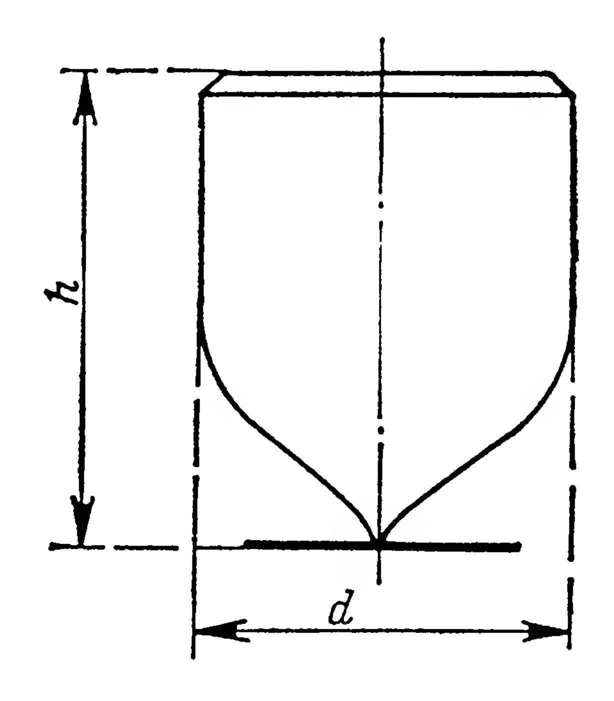



Рис. 5. Новгородский волчок

Только в прошлом столетии этому вопросу стали уделять должное внимание. Велись теоретические и экспериментальные исследования законов движения волчка, являющегося основным элементом современных гироскопических приборов. В эти исследования наши отечественные ученые внесли весомый вклад. Работы О. И. Сомова (1815—1876), Д. К. Бобылева (1842—1918), Н. Е. Жуковского (1847—1921), С. В. Ковалевской (1850—1891), А. С. Домогарова (1854—1921) и их последователей заложили классическую основу современной теории гироскопа.

В нашей стране благоприятные условия для широкого практического использования гироскопов были созданы лишь после Великой Октябрьской социалистической революции. Известно, что В. И. Ленин внимательно следил за работами К. Э. Циолковского [16], Ф. А. Цандера [53] и их последователей, мечтающих о межзвездных полетах, и своими выдающимися работами способствовавших развитию тех областей знаний, которые вели к их осуществлению. В частности, их идеи послужили стимулом для развития гироскопических приборов, являющихся одним из основных элементов систем управления летательными аппаратами.

Несмотря на экономические трудности первых лет, Советское государство даже в те годы обеспечивало возможности издания литературы по гироскопическим устройствам. Уже в 1921 году

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТИМИРЯЗЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
изучения и пропаганды естественно-научных основ диалектического материализма

СЕРИЯ IX

„НА ПУТИ К МАТЕРИАЛИЗМУ"
(Пособия для учителя и самообразования)

ВЫПУСК № 17

Проф. Дж. Перри

# Вращающийся волчок

Перевод с последнего дополненного английского издания С. ДАВЫДОВА и Н. ЛИХТГЕЙМА
под редакцией З. ЦЕЙТЛИНА

„СЕВЕРНЫЙ ПЕЧАТНИК"

Вологда, 1926

Рис. 6. Титульный лист книги Дж. Перри

Рис. 7. Восхищение вращающимся волчком

Рис. 8. Почему он не падает?

выходит в свет книга Б. И. Кудревича [25], посвященная принципам построения гироскопического компаса, а в 1922 году — книга о проекте однорельсовой железной дороги Петроград — Гатчина [38], вагоны которой предполагалось удерживать в горизонтальном положении с помощью гироскопических стабилизаторов. Наконец, в 1926 году в серии «На пути к материализму» издается массовым тиражом популярная книга Перри [32] о вращающемся волчке (рис. 6).

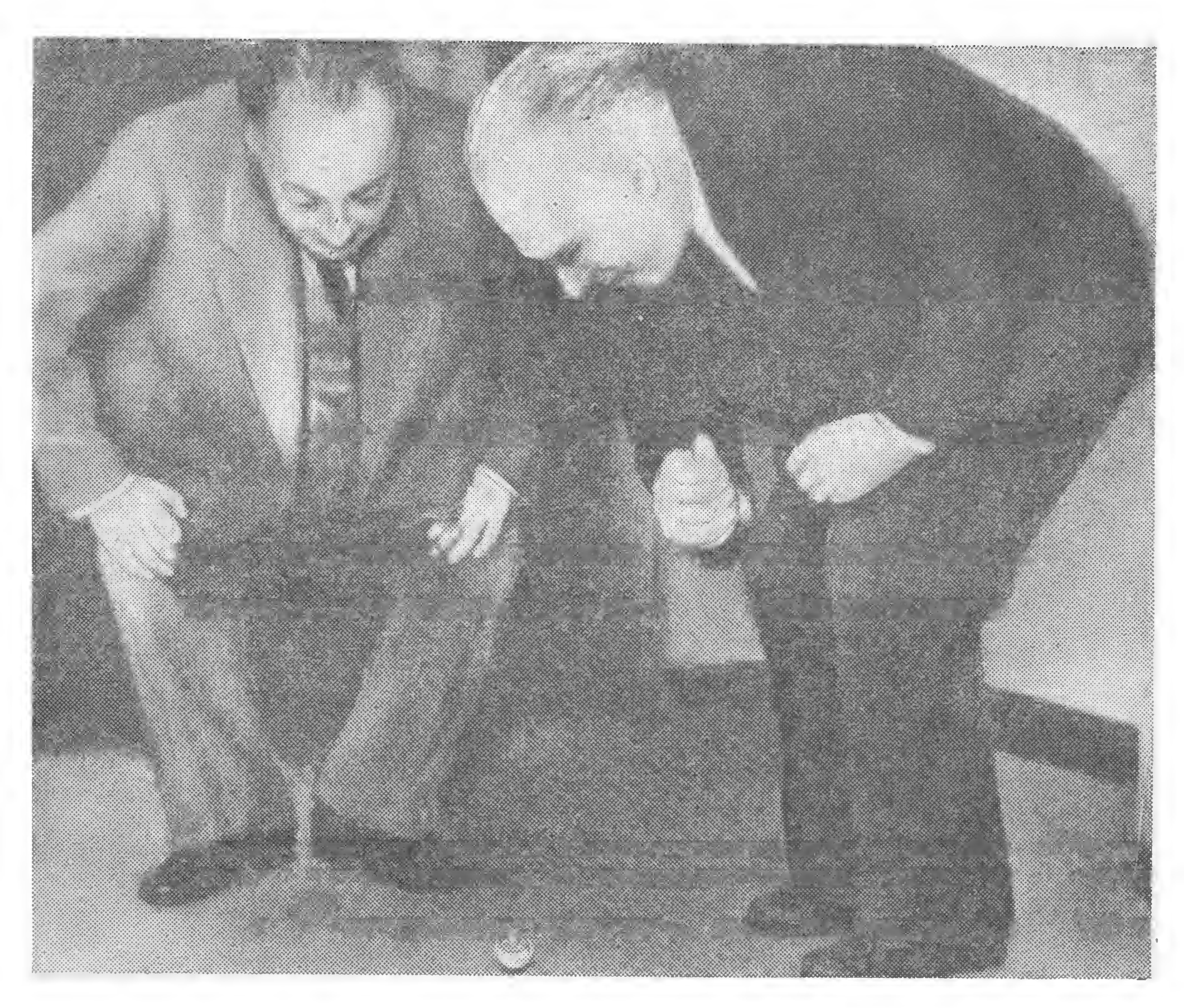


Рис. 9. Удивительное поведение волчка

Во втором десятилетии XX века в Советском Союзе организуется серийный выпуск передовых для того времени гирокомпасов и гирорулевых для судов морского флота, а также курсоуказателей, гирогоризонтов, гиротахометров, автопилотов для самолетов и много других гироскопических приборов. Тем самым были созданы необходимые предпосылки для решения в нашей стране многих важнейших научно-технических проблем и, в первую очередь, освоения космического пространства.

С того памятного зимнего московского вечера 1920 года, когда В. И. Ленин обсуждал с Ф. А. Цандером возможности осуществления космических полетов, не прошло и четырех

десятилетий, когда весь мир узнал о том, что Советский Союз стал первооткрывателем космических просторов. Гражданин СССР, коммунист Ю. А. Гагарин первым из землян 12 апреля 1961 года преодолел поле земного тяготения, открыв тем самым эру освоения человеком межзвездного пространства.

Навигация космических аппаратов, основанная на их ориентации относительно небесных тел, требует установки внутри корпуса таких аппаратов гироскопов, сохраняющих направление в пространстве оси своего вращения неизменным. Космонавт-2 Г. С. Титов писал в своей книге [47], что стремительно вращающиеся волчки «запоминают» заданное кораблю направление движения. При любом отклонении от него они выдают команды на приводы, которые обеспечивают возвращение корабля на заданный курс.

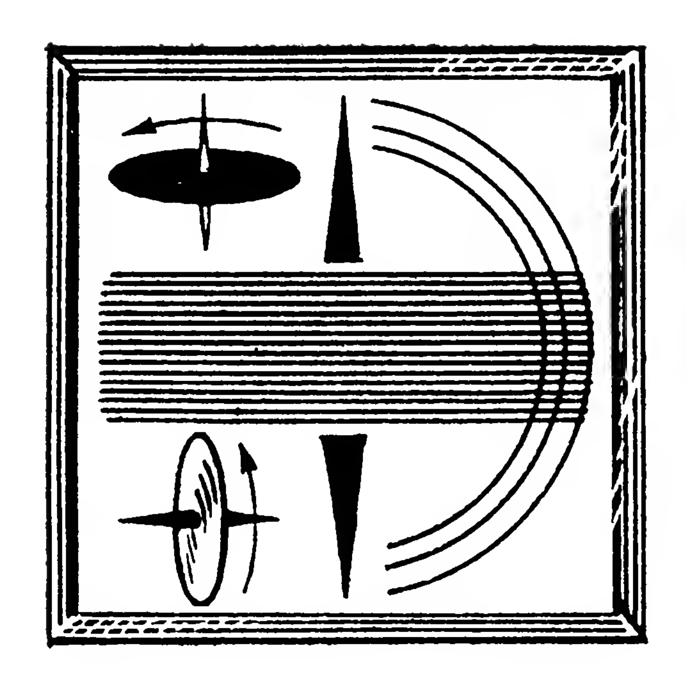
Вращающийся волчок обеспечивает удержание на требуемом курсе морских судов, воздушных лайнеров, а также танков и ракет. Он способствовал тому, что советским людям удалось первыми осуществить многовековую мечту человечества о достижении на надводном корабле Северного полюса Земли. Как писали участники героического плавания [54], накануне того исторического дня, когда советский атомоход «Арктика» * находился вблизи полюса, специалисты провели дополнительную проверку гироскопических навигационных приборов, фиксирующих точное направление атомохода на ту точку земной поверхности, от которой любое направление ведет на юг. Указанные гироскопы и вывели 17 августа 1977 года «Арктику» с астрономической точностью на Северный географический полюс Земли.

В наше время вращающийся волчок находит все более широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Однако его свойства и сегодня вызывают у человека восхищенное удивление. Посмотрите на то, с каким изумлением наблюдает малыш (рис. 7) за вращением современного игрушечного волчка, как учащиеся младших классов средней школы наблюдают за поведением гироскопа (рис. 8).

Гироскоп привлекает внимание не только детей и юношества. Даже виднейшие ученые современности Н. Бор и В. Паули [45], как показано на рис. 9, в свое время с нескрываемым изумлением следили за поведением переворачивающегося волчка.

Возрастание интереса человечества к свойствам вращающегося волчка вполне закономерно. Чем подробнее будут изучены эти свойства, тем глубже станут наши познания о многих еще не полностью изученных явлениях природы. Уточнение законов движения волчка позволит также усовершенствовать существующие и создать новые машины и аппараты, увеличивающие производительность человеческого труда.

* С 1982 г. «Леонид Брежнев».



# I

# ПОЧЕМУ ЛЮДИ ЗАИНТЕРЕСОВАЛИСЬ ВОЛЧКОМ

## 1. Развитие мореплавания

С незапамятных времен наши предки для постройки своих жилищ выбирали высокие берега рек и озер. Вода привлекала человека как обилием рыбы, употребляемой в пищу, так и возможностью сравнительно легкого перемещения от одного стойбища к другому. По рекам были проложены пути протяженностью многие тысячи километров, и люди еще в глубокой древности научились использовать водные просторы для сообщения между отдельными племенами и народностями. Плавая по рекам и озерам, они отмечали наиболее характерные особенности берегов и по ним определяли пройденный путь. Населенные пункты, возвышенности и овраги, лесные массивы и отдельные деревья, места слияния или разветвления рек служили человеку ориентирами для уточнения местоположения. Сведения о них передавались от одного поколения другому, способствуя дальнейшему освоению речных путей.

Продвигаясь вдоль рек, люди нередко достигали выходов на морские просторы. Первоначально они плавали по морю лишь вдоль берегов. Когда на них не оказывалось естественных ориентиров, возводились искусственные сооружения, остатки которых до сих пор стоят на многих морских берегах. Особенно большое количество созданных руками человека старинных мореходных знаков в виде огромных груд валунов, башен, высоких крестов и других подобных сооружений сохранилось на берегах наших северных морей.

Ограниченное передвижение по морю вдоль побережья не могло удовлетворить потребности людей. Поиски рыбы, охота за морским зверем, торговля и военные походы заставляли уходить все дальше от родных берегов в открытое море. Дошедшие до нас письменные документы и археологические находки говорят о том, что за несколько веков до нашей эры китайские мореплаватели проложили морские пути на Японские и Филиппинские острова, а индусские племена — на Борнео, Суматру и Яву.

Народы, населявшие Месопотамию, Египет, Византию и юг Западной Европы, плавали по Средиземному, Красному и Аравийскому морям.

С начала нашей эры на морях, омывающих с севера берега восточной части Европы, начали появляться славяне. Как свидетельствуют исторические памятники VI—VII веков, уже в те времена они неоднократно совершали походы по Каспийскому морю в Персию, а по Черному к его южным берегам и в Константинополь. Старинные летописи рассказывают о походах славян даже по Средиземному морю на остров Крит, и далее до Апеннинского и Пиренейского полуостровов.

Приморские славяне, поселившиеся на берегах Белого и Баренцева морей, совершали смелые походы как на Восток, так и на Запад. Часто в поисках морского зверя охотники уходили в открытое море за сотни километров, прокладывая пути из Белого моря вокруг Скандинавии на Балтику, а через Югорский Шар и Карское море — в устье Оби.

Примерно в те же времена русские поморы через Баренцево, или Студеное, море проложили путь на Грумант, как называли тогда остров Шпицберген, у берегов которого они вели китобойный и тюлений промыслы. Смелые, энергичные люди шли на освоение безбрежных просторов морей и океанов. И чем дальше уходили они в открытое море, тем сложнее было определять местоположение судна. Среди морских просторов уже нельзя было воспользоваться береговыми ориентирами, и для определения своего местоположения мореходам приходилось создавать специальные приборы.

## 2. Географические координаты

Как же определить свое положение в открытом море? Вспомним, что Земля, форма которой близка к шару (рис. 10), непрерывно вращается в мировом пространстве вокруг своей оси $NS$,

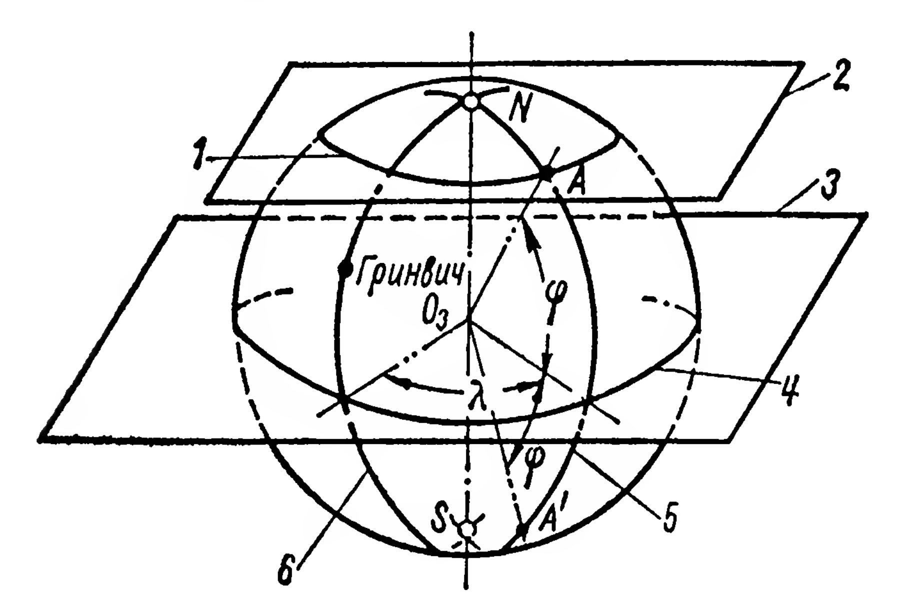



Рис. 10. Географические координаты

1 — параллель, или широта, точки $A$; 2 — плоскость параллели; 3 — плоскость экватора; 4 — экватор; 5 — меридиан, или долгота, точки $A$; 6 — главный меридиан

проходящей через центр $O_з$ Земли и точки на ее поверхности, соответствующие $N$ — Северному, а $S$ — Южному географическим полюсам.

Плоскость экватора, проходящая через центр $O_з$ и пересекающая земной шар перпендикулярно оси $NS$, делит его на се-

верное и южное полушария. Получающуюся при этом линию пересечения называют **экватором**. Плоскость, параллельная плоскости экватора, образует при пересечении с земной поверхностью линию, получившую название **параллели**.

Через любую точку $A$ земной поверхности можно провести соответствующую параллель, отстояние которой от плоскости экватора характеризуется углом $\varphi$ широты данной точки, образуемым радиусом $O_3A$, проведенным в нее из центра $O_3$ Земли, и плоскостью экватора. Углу $\varphi$ соответствуют широты двух точек: $A$ и $A'$, одна из которых расположена в северном, а другая в южном полушариях. Для их различия широты, лежащие между экватором и полюсом $N$, называют северными, а лежащие между экватором и полюсом $S$ — южными.

Угла $\varphi$ недостаточно для однозначного определения положения точки $A$ на земной поверхности, так как на одной и той же широте расположены все точки, лежащие на данной параллели. Для точного описания положения точки $A$ земной шар мысленно рассекают проходящей через точки $O_3$, $A$ и оба географических полюса $N$ и $S$ плоскостью меридиана, которая при пересечении с земной поверхностью образует линию **меридиана** данной точки.

Положение меридиана точки $A$ определяется углом $\lambda$ географической долготы, отсчитываемым в восточном или западном направлениях от главного меридиана, проходящего через точку расположения Гринвичской астрономической обсерватории в Англии. Таким образом, положение любой точки на земной поверхности определяется значениями двух углов $\varphi$ и $\lambda$, являющихся ее географическими координатами. Эти параметры определяют и местоположение на земной поверхности любого подвижного объекта в произвольно выбранный момент времени.

## 3. Методы определения географических координат в открытом море

Солнце и звезды с давних пор являются естественными ориентирами при определении местоположения объекта на земной поверхности. Находящимся на Земле небесные светила кажутся расположенными на окружающей земной шар небесной сфере (рис. 11), центр которой представляется совмещенным с центром $O_3$ Земли. Точки $P_N$ и $P_S$, в которых земная ось пересекает небесную сферу, называют **северным и южным полюсами мира**.

Среди небесных светил имеются звезды, находящиеся в непосредственной близости от полюсов мира. Особенно близко к полюсу $P_N$ расположена Полярная звезда $L$. Луч $O_3L$, проведенный в ее направлении из точки $O_3$, образует с осью $P_NP_S$ угол около 1°. По расположению Полярной звезды над плоскостью горизонта, касательной к земному шару в выбранной точке $A$

его поверхности, и определяется в ночное время географическая широта данной точки.

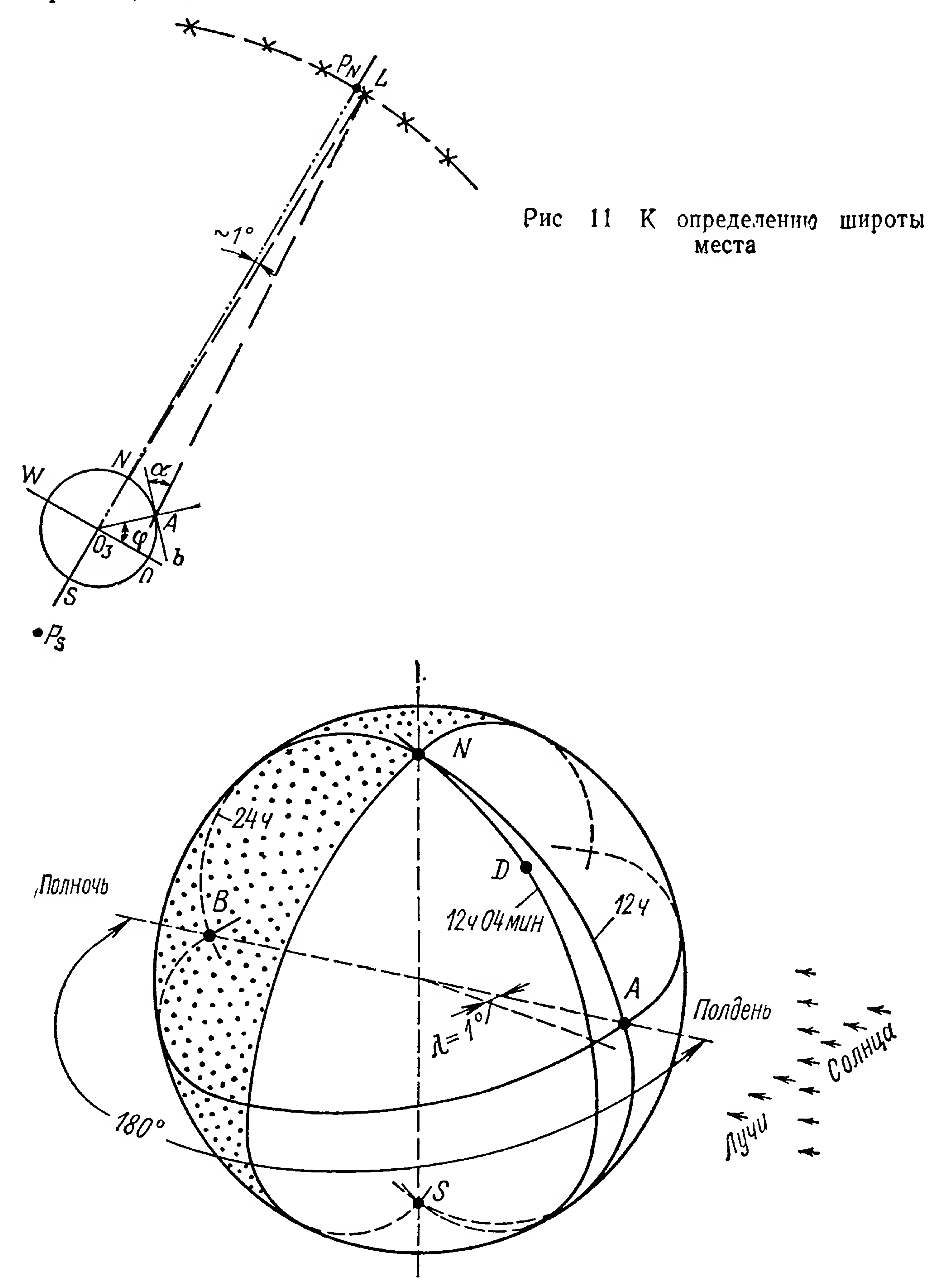



Рис 11 К определению широты места

Рис 12. К определению долготы места

Принимая во внимание, что Полярная звезда удалена от Земли на столь большое расстояние, что диаметр Земли по сравнению с расстоянием $O_3L$ можно трактовать как точку, направление $AL$ на Полярную звезду из любого пункта на ее поверхности

практически можно считать параллельным оси мира $P_N P_S$. В силу этого для определения широты $\varphi$ точки $A$ достаточно измерить угол $\alpha$ между направлением $AL$ и плоскостью горизонта $Ab$. Действительно, благодаря перпендикулярности сторон $O_3W$ и $AL$, а также $O_3A$ и $Ab$ угол $\alpha$, называемый высотой светила, практически равен углу $\varphi$ географической широты местности.

В дневное время широту местности определяют по Солнцу, измеряя в полдень его высоту над горизонтом. Такой метод несколько сложнее описанного выше в связи с изменением положения Земли относительно Солнца в разные времена года, но принцип определения широты остается прежним.

По высоте Солнца над горизонтом определяется и географическая долгота места. В полдень, когда оно занимает наивысшее положение над горизонтом, местное время для данного меридиана $NAS$ (рис. 12) равно 12 ч. В это же мгновение на противоположном меридиане $NBS$, образующим с первым угол 180°, — полночь и местное время равно 24 ч.

Каждому меридиану соответствует присущее ему местное время. Если разница во времени между меридианами $NAS$ и $NBS$, отстоящими на угол 180°, равна 12 ч, или 720 мин, то между меридианами $NAS$ и $NDS$, образующими между собой угол долготы $\lambda = 1°$, разница во времени составит 4 мин. Вычислив разницу во времени наступления полдня в определенных пунктах Земли, и находят долготу $\lambda$ между ними.

Таковы, в общих чертах, способы, используемые с давних пор мореплавателями для определения координат судна в открытом море. Правда, для определения угла $\alpha$ высоты светила (см. рис. 11) при отсутствии видимости до горизонта на судне необходимо иметь площадку, сохраняющую горизонтальное положение. Это требование сравнительно легко осуществимо в тихую погоду, но на волнении, когда корабль непрерывно раскачивается, выдержать горизонтальное положение трудно.

Отсутствие площадки, сохраняющей горизонтальное положение, приводило к большим погрешностям при вычислении географических координат судна. В результате оно отклонялось от заданного курса, что нередко приводило к аварии.

## 4. Практическое использование волчков новгородскими мореплавателями

Как уже отмечалось, результаты раскопок в Великом Новгороде позволили утверждать, что новгородцы уже в X столетии использовали деревянные волчки в практических целях. Действительно, есть все основания полагать, что эти волчки (см. рис. 5) предназначались для определения на корабле географической широты его местоположения.

Для определения широты судна северные поморы, резко сдергивая намотанную на волчок бечевку, придавали ему вращение

вокруг оси $OA$ (рис. 13) на площадке $K$, удерживаемой руками человека в положении, близком к горизонтальному. Тем самым при соответствующем навыке обеспечивалось совмещение оси $OA$ волчка с вертикалью $O_3Z$ места, а его торцевой поверхности $aA$ — с плоскостью, параллельной плоскости горизонта.

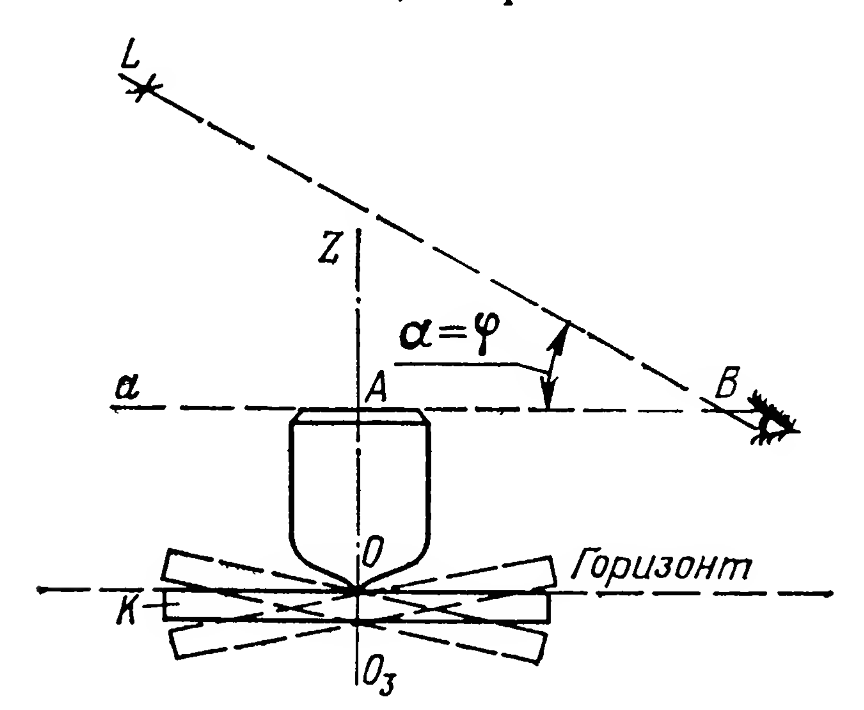



Рис. 13. Использование волчка для определения широты места

При этом условии угол $\alpha$ выбранного светила $L$, образуемый направлением $BL$ на него и торцевой поверхностью $aA$ волчка, и определял величину $\varphi$ географической широты места наблюдения $B$. Таков возможный принцип использования новгородского волчка при определении поморами географической широты корабля.

## 5. Секстан

Новгородские умельцы изготовляли волчки для мореплавателей с X по XV столетия включительно, а затем их стали вытачивать уже непосредственно на берегах Белого моря.

Свойства вращающегося волчка с годами продолжали привлекать к себе все большее внимание. В XVII—XVIII столетиях изучением особенностей движения волчка, наряду с отечественными, занимаются и многие виднейшие зарубежные ученые: И. Ньютон (1642—1727), Ж. Даламбер (1717—1783) и член Российской академии наук Л. Эйлер (1707—1783). Именно Л. Эйлер в 1765 г. впервые систематизированно изложил теорию вращательного движения твердого тела при неподвижности точки его опоры и тем самым создал научную основу для дальнейшего более глубокого изучения законов движения волчка. Последовавшие затем работы Ж. Лагранжа (1736—1813), П. Лапласа (1749—1827), Л. Пуансо (1777—1859) и С. Пуассона (1781—1840) во многом содействовали дальнейшему изучению и разработке методов практического использования свойств быстровращающегося волчка.

Однако практическое использование волчка в Западной Европе началось фактически лишь во второй половине XIX столетия. В частности, в 1886 г. французский адмирал Флерие пред-

ложил гироскопический прибор для измерения широты φ, аналогичный по своей идее новгородскому волчку, но отличающийся более совершенной конструкцией.

Основой прибора, названного **секстаном**, был волчок *P* (рис. 14) массой 175 г, которому с помощью сжатого воздуха, подаваемого ручным насосом через шланг *Q*, сообщалось вращение вокруг оси *AA* с частотой около 300 об/мин.

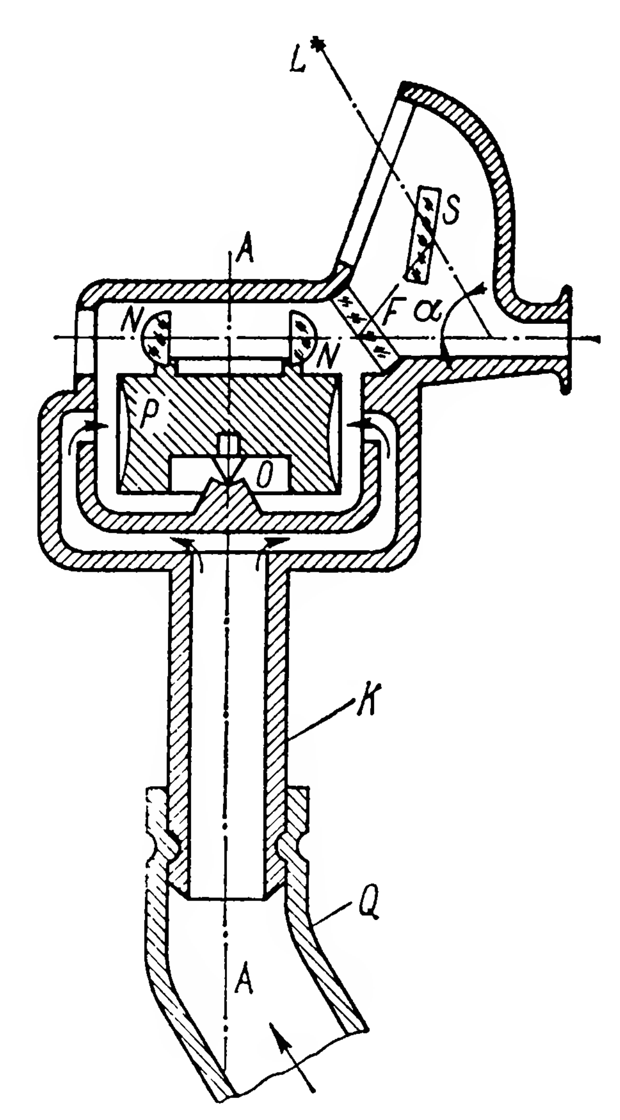


Рис. 14. Секстан

Корпус *K* прибора удерживался рукой человека в положении, близком к вертикальному. При этом волчок *P*, благодаря маятниковому смещению его центра массы на 1 мм от точки *O*, стремился вращаться в плоскости горизонта. Вместе с волчком вращались горизонтально и две линзы *N*, закрепленные на его торцевой поверхности. Строго параллельно последней на линзах *N* были нанесены тонкие штрихи, которые при вращении волчка сливались для глаза наблюдателя в сплошную горизонтальную линию. Относительно этой линии и измерялся угол α высоты наблюдаемого светила *L*. Для обеспечения одновременного наблюдения как за линией искусственного горизонта, так и за светилом *L* в секстане были предусмотрены два зеркала *F* и *S*. Поворотом последнего луч, направленный на светило *L*, совмещался с линией искусственного горизонта. Угол поворота зеркала *S* по величине соответствовал углу α, характеризующему высоту светила в данный момент времени.

## 6. Волчок в кардановом подвесе

Сравнение схем рассмотренных выше приборов (см. рис. 13 и 14) указывает на их общность. В обоих случаях в точке опоры *O* отсутствует двухсторонняя удерживающая связь. Поэтому при наклоне основания (рис. 15) волчок, сохраняя неизменным направление оси вращения *AA*, начинает сползать в сторону наклона опорной площадки. При сильной качке или при резких ударах волн о судно волчок соскакивал с основания, что нарушало нормальную работу прибора.

Знаменитый физик Л. Фуко (1819—1868) нашел способ устранить этот недостаток, подвесив в 1852 г. волчок в корпусе *K* прибора с помощью двух карданowых колец *BK* и *HK* (рис. 16), обеспечив тем самым неизменное положение точки его опоры *O* относительно корпуса *K*. Карданов подвес позволил придать волчку форму массивного ротора *P*, свободно вращающегося на

опорах вокруг главной оси *AA* его подвеса во внутреннем кольце *ВК*. Последнее монтировалось в наружном кардановом кольце *НК* с помощью опор, расположенных на оси *ВВ*. Благодаря этому ротор *Р* вместе с кольцом *ВК* получил свободу вращения вокруг внутренней оси *ВВ*, укрепленной в наружном кольце *НК* подвеса. В свою очередь наружное кольцо с помощью опор, расположенных на оси *СС*, монтировалось в корпусе *К* прибора, чем и обеспечивалось ротору *Р* (вместе с кольцами *ВК* и *НК*) свобода вращения вокруг наружной оси подвеса *СС*.

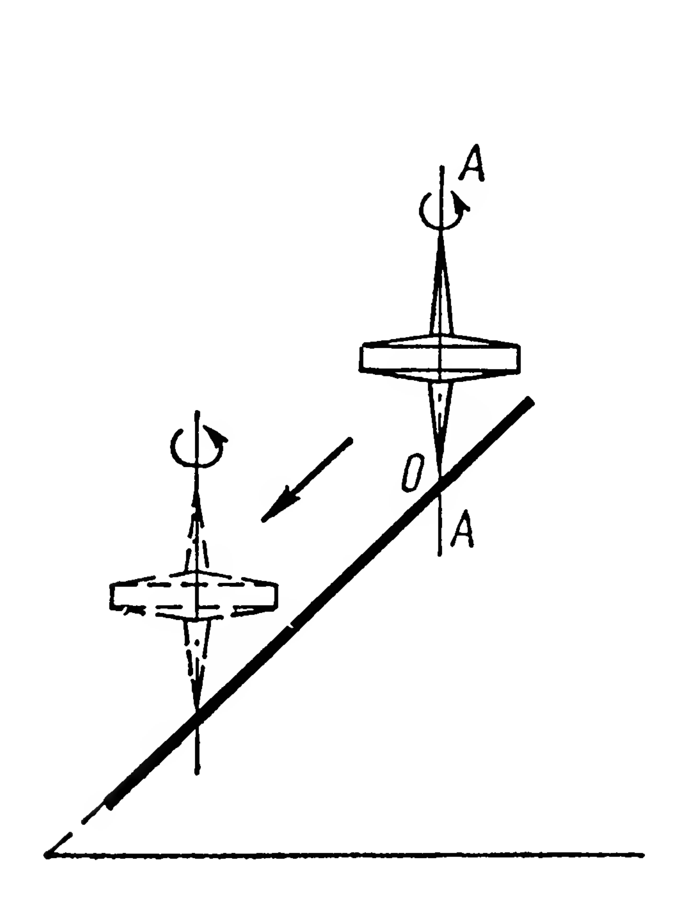



Рис. 15. Смещение волчка на наклонной плоскости

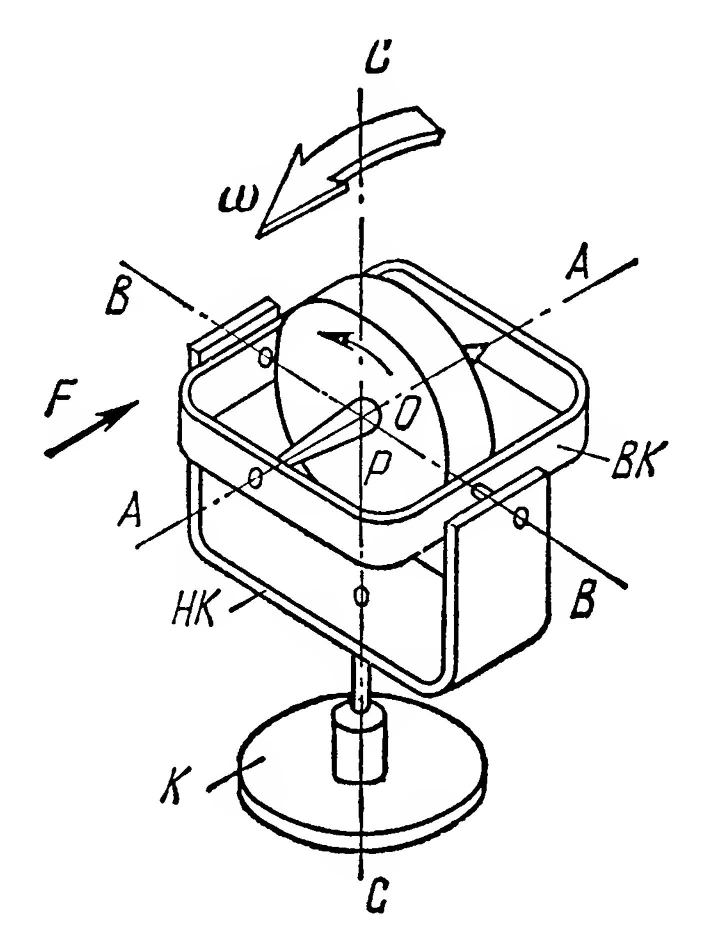
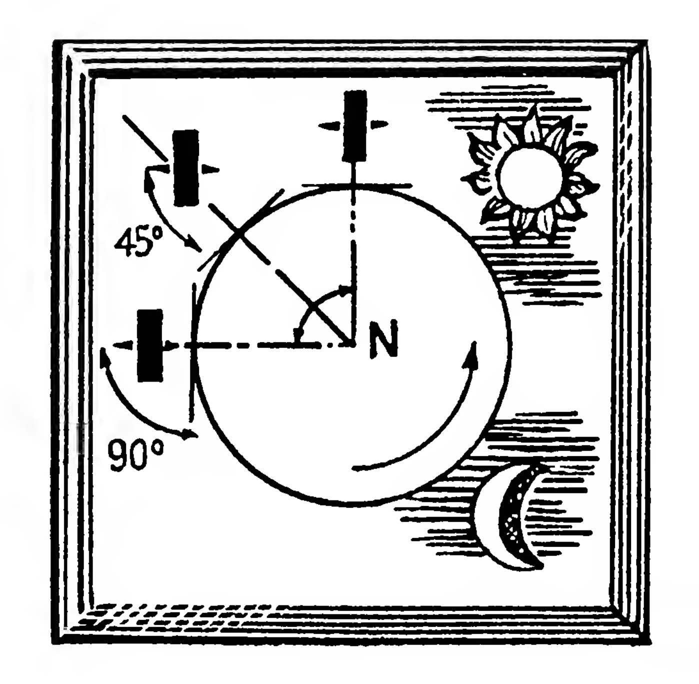



Рис. 16. Волчок в кардановом подвесе

Сравнивая схему волчка в кардановом подвесе с элементарным волчком (см. рис. 15), убеждаемся в общности принципа их действия. В обоих случаях волчки имеют одну неподвижную точку опоры *О*. Различие между ними заключается лишь в характере связи волчка и основания. У элементарного волчка эта связь не является удерживающей и позволяет его точке опоры перемещаться относительно основания, тогда как у волчка в кардановом подвесе она является удерживающей, т. е. препятствует перемещению точки опоры относительно корпуса прибора.

Описанная конструкция волчка в кардановом подвесе сохранилась до наших дней. Она является основным элементом многих приборов и наглядной моделью для демонстрации замечательных свойств быстровращающегося волчка с двухсторонней удерживающей связью.







# ПРИРОДА ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

## 7. Гироскоп и его основные свойства

Опыты с волчком, подвешенным в корпусе *К* с помощью двух кардановых колец *ВК* и *НК* (см. рис. 16), позволили установить его способность не только сохранять неизменной ориентацию в пространстве оси *АА* своего вращения, но и оказывать сопротивление любому усилию, стремящемуся изменить первоначальное положение этой оси.

Подействуйте на кольцо *НК* силой *F*, пытаясь повернуть волчок вокруг оси *СС*, и вы убедитесь в тщетности такой попытки. Волчок, оказывая сопротивление приложенному усилию *F*, начнет уклоняться от него, поворачиваясь вокруг оси *ВВ* в направлении стрелки ω. При этом скорость уклонения будет тем выше, чем больший момент относительно точки *O* создает усилие *F*. Таким образом, чем меньшие моменты относительно точки подвеса волчка создают действующие на него внешние силы, тем с большей точностью ось *АА* его собственного вращения сохраняет свое направление в пространстве. Это свойство открывало перспективы практического использования вращающегося волчка.

Представим, что мы наблюдаем из мирового пространства за земным шаром со стороны его Северного полюса *N* (рис. 17). Пусть в начальный момент времени мы видим волчок установленным на экваторе в точке $B_0$ так, что его ось *АА* расположена горизонтально и направлена с запада на восток.

Вследствие суточного вращения Земли точка $B_0$ непрерывно изменяет свое положение в пространстве. По прошествии трех часов она займет положение точки $B_3$, через шесть — точки $B_6$, через двенадцать часов — точки $B_{12}$ и т. д. Это будет происходить до тех пор, пока она вновь не вернется в исходное положение по истечении 24 часов. Плоскость горизонта в любой точке земной поверхности является перпендикулярной радиусу Земли. Поэтому для наблюдающего из мирового пространства ее положение при расположении точки земной поверхности на

экваторе будет казаться прямой линией. Так, в точке $B_0$ это будет прямая $b_0b_0$, в точке $B_3$ — прямая $b_3b_3$, в точке $B_6$ — прямая $b_6b_6$ и т. д. Нетрудно заметить, что плоскость горизонта непрерывно изменяет свое положение в пространстве.

В суточном вращении Земли участвует и точка подвеса волчка, неподвижно закрепленная посредством кардановых колец на земной поверхности. Однако главная ось $AA$ волчка не сохранит неизменным свое положение относительно плоскости горизонта. Оставаясь неподвижной в мировом пространстве, она постепенно будет отклоняться от плоскости горизонта, причем угол этого отклонения будет равен углу поворота земного шара.

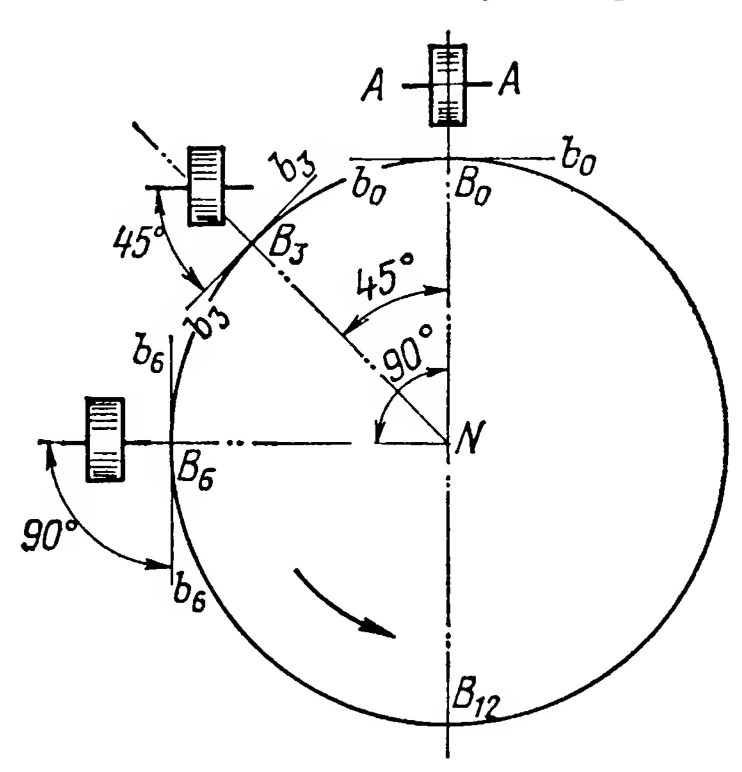



Рис. 17. Отклонение волчка с течением времени от плоскости горизонта

Наблюдатель, находящийся на земной поверхности рядом с волчком в кардановом подвесе, сможет по отклонению его главной оси от плоскости горизонта определить угол поворота земного шара вокруг своей оси. Как видим, прибор, созданный Фуко, позволил установить факг суточного вращения Земли, почему он и был назван гироскопом *.

Опыты с гироскопом выявили и другие возможности его практического применения. Оказалось, что он указывает плоскости как горизонта, так и меридиана; помогает определить географические широту и долготу местности, измерить угловые скорости и ускорения движущихся платформ и ряд других параметров их движения. Для уяснения физической сущности указанных свойств гироскопа обратимся к некоторым основным понятиям и законам механики.

## 8. Некоторые сведения из механики

Свойство гироскопа двигаться в направлении, перпендикулярном к действующему на него усилию, подчинено общим законам механики, согласно которым изменения скорости и направления движения тела не могут происходить без воздействия

* От греческих слов: γνροσ (гирос) — вращение и σκοπεω (скопео) — смотреть.

на него внешних сил. В отсутствие последних, согласно закону Ньютона, любое тело $A$ (рис. 18, $a$) стремится сохранить состояние покоя или равномерного прямолинейного движения в направлении $ab$ с постоянной скоростью $v$. На схеме скорость $v$ показана вектором со стрелкой на конце в виде отрезка прямой $nl$, совпадающим по направлению с прямой $ab$. Длина $nl$ вектора в условном масштабе соответствует значению скорости $v$.

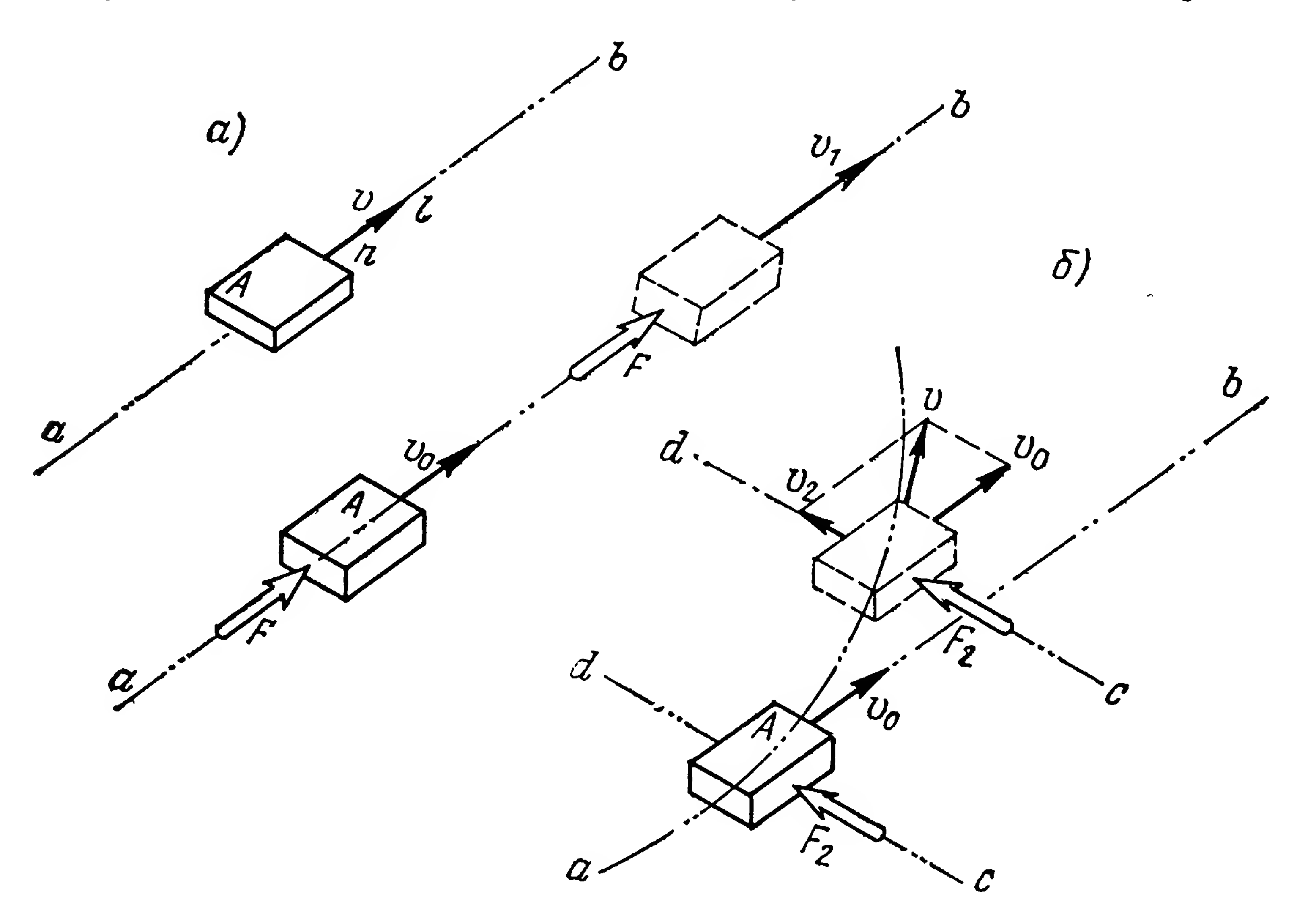



Рис. 18. Различные виды движения тела: *а* — прямолинейное; *б* — по криволинейной траектории

И. Ньютон установил, что ускорение $w$ тела, характеризующее изменение скорости его движения в единицу времени, пропорционально действующей на тело силе $F$ и обратно пропорционально его массе $m$. Такой вывод, имеющий всеобщий характер, известен как второй закон Ньютона и выражается формулой

$$w = \frac{F}{m},$$

из которой следует, что

$$F = mw. \qquad (1)$$

Для изменения скорости и направления движения тела необходимо внешнее усилие $F$, тем большее, чем больше масса $m$ тела и ускорение $w$, которое ему требуется сообщить. Именно масса тела является показателем его инерции, т. е. способности сохранять неизменными параметры движения тела независимо от того, находится ли оно в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения.

Если на тело $A$, движущееся по прямой $ab$ со скоростью $v_0$, в направлении его движения действует сила $F$, то по истечении

времени $\Delta t$ оно будет продолжать двигаться в прежнем направлении $ab$, но уже со скоростью $v_1$. Изменение скорости за время $\Delta t$ и характеризует ускорение тела

$$w = \frac{v_1 - v_0}{\Delta t},$$

измеряемое в метрах на секунду в квадрате.

Действие силы может изменить как скорость, так и направление движения тела. Пусть, например, тело $A$ движется в направлении $ab$ со скоростью $v_0$. При действии на него силы $F_2$ в направлении $cd$, перпендикулярном $ab$, под ее влиянием тело получит ускорение в направлении $cd$. В результате к моменту времени $\Delta t$ оно кроме скорости $v_0$ приобретет еще и скорость $v_2$ в направлении $cd$.

Суммарная скорость $v$, полученная как результат сложения векторов $v_0$ и $v_2$, графически определится длиной диагонали параллелограмма, стороны которого равны соответственно векторам $v_0$ и $v_2$. Направление дальнейшего движения тела $A$ будет совпадать с направлением этой диагонали.

Угловую скорость вращающегося тела измеряют в радианах в секунду. Скорость в один радиан * в секунду соответствует такой скорости вращения тела, при которой оно за одну секунду совершает поворот на угол $\varphi_R$ (рис. 19), равный центральному углу, опирающемуся на дугу $cd$, длина которой равна радиусу $R$

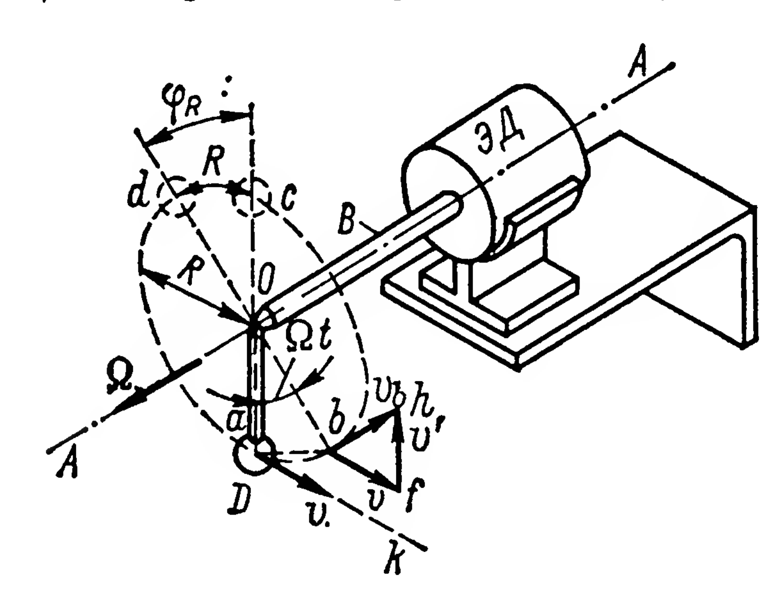



Рис. 19. К определению центростремительного ускорения

окружности. В тех случаях когда тело за время 1 с совершает один полный оборот, поворачиваясь на 360°, его угловая скорость, выраженная в радианах в секунду, будет равна

$$\Omega = \frac{2\pi R}{R} = 2\pi.$$

Если же тело в течение 1 мин совершит $n$ оборотов, то его угловая скорость определится из равенства

$$\Omega = 2\pi \frac{n}{60}.$$

Величина угловой скорости $\Omega$ не дает полной информации о вращении тела. Необходимо знать еще его направление и по-

* Один радиан равен 57,3°.

ложение в пространстве оси вращения $AA$. С этой целью угловая скорость изображается вектором, длина которого в выбранном масштабе характеризует численное значение $\Omega$, а его направление указывается стрелкой, при наблюдении с конца которой вращение тела должно представляться происходящим против часовой стрелки.

При вращении даже с постоянной угловой скоростью тело тем не менее обладает ускорением. Действительно, приводя вал $B$ электродвигателя *ЭД* во вращение вокруг оси $AA$ с постоянной угловой скоростью $\Omega$, заставим шарик $D$, соединенный с валом $B$ нерастяжимой нитью $OD$, двигаться по окружности радиуса $R$. Если бы шарик $D$ двигался равномерно и прямолинейно, то, начиная, например, с точки $a$, его перемещение происходило бы по прямой $ak$. Но шарик движется по окружности радиуса $R$, поэтому в точке $b$ направление скорости $v_b$ будет отличаться от направления скорости $v$, хотя численные значения скоростей остаются неизменными.

Поскольку $v$ и $v_b$ являются скоростями одного и того же непрерывно движущегося тела $D$, то очевидно, что скорость $v_b$ образовалась из начальной скорости $v$, получившей по тем или иным причинам изменение на величину $v'$. Скорости $v$ и $v'$ и дают в геометрической сумме ту результирующую скорость $v_b$, с которой и движется тело $D$.

Учитывая, что при равенстве скоростей $v$ и $v_b$ треугольник $bfh$ является равнобедренным и подобным треугольнику $Oab$, у которого обе стороны $Oa$ и $Ob$ равны радиусу $R$, можно составить уравнение отношения сторон этих треугольников:

$$\frac{fh}{bf} = \frac{ab}{Oa}.$$

Отрезки $bf$ и $fh$ в выбранном масштабе равны $v$ и $v'$, а дуга $ab$ равна $R\Omega t$. В то же время при малом угле $\Omega t$ дуга $ab$ практически равна хорде $ab$. Поэтому перепишем последнее равенство в виде

$$\frac{v'}{v} = \frac{R\Omega t}{R},$$

откуда находим $v' = v\Omega t$.

Такова дополнительная скорость, сообщаемая телу при повороте вала $B$ двигателя *ЭД* на угол $\Omega t$. Рассматривая поворот вала за малое время $t$, когда угол $\Omega t$ близок к нулю, убеждаемся, что дополнительная скорость $v'$ направлена по радиусу $R$ к центру вращения тела $D$. Отнеся скорость $v'$ ко времени $t$ изменения скорости $v$, находим значение так называемого центростремительного ускорения по формуле

$$w_ц = \frac{v'}{t} = \frac{v\Omega t}{t} = v\Omega.$$

Как уже отмечалось, для того чтобы сообщить телу ускорение, на него надо воздействовать внешним усилием. В рассмат-

риваемом случае это усилие совпадает по направлению с радиусом $R$ и действует на тело $D$ со стороны нерастяжимой нити $OD$. В свою очередь тело $D$ действует на нить силой, равной по величине внешнему усилию, но противоположной ему по направлению. Такие силы, пропорциональные массе движущегося тела и оказывающие сопротивление внешним усилиям, называются силами инерции.

При нарушении связи между валом $B$ и телом $D$ последнее прекратит движение с центростремительным ускорением по окружности и будет двигаться прямолинейно по касательной к ней с постоянной скоростью. В этом легко убедиться на опыте. Используйте в качестве связи между валом $B$ и телом $D$ обычную суровую нить. Приведите во вращение вал двигателя *ЭД*, а вместе с ним и шарик $D$. Приготовьте острую бритву и в тот момент, когда центр шарика будет подходить к точке $a$, быстро перережьте нить. Шарик сразу же прекратит движение по окружности и начнет перемещаться вдоль прямой $ab$, с которой в момент перерезывания нити был совмещен вектор скорости $v$.

## 9. Поворотное ускорение

Рассмотрим еще один важный для понимания физической сущности гироскопических явлений случай движения тела, характеризуемый одновременным его вращением вокруг двух осей. Представим себе, что корпус электродвигателя *ЭД*, с валом $B$ которого нитью $OD$ соединен шарик $D$, может поворачиваться вокруг вертикальной оси $CC$ (рис. 20).

Сообщим валу $B$ вращение вокруг оси $AA$ при неподвижном пока положении двигателя двигателем *ЭД*. Вместе с валом $B$ начнет вращаться вокруг оси $AA$ и шарик $D$, перемещающийся по окружности $abc$, лежащей в плоскости $Q$, перпендикулярной оси $AA$. В то мгновение, когда центр шарика $D$ совместится с точкой $a$ на окружности $abc$, приведем корпус двигателя *ЭД* во вращение вокруг оси $CC$ и проследим за дальнейшим перемещением шарика $D$ в течение малого промежутка времени $\Delta t$. Если бы вал $B$ не вращался вокруг оси $CC$, то по прошествии времени $\Delta t$ центр шарика $D$, совершив вокруг оси $AA$ поворот на угол $\Omega\Delta t$, совместился бы с точкой $b$ на окружности $abc$.

Но вследствие вращения корпуса двигателя *ЭД* вокруг оси $CC$ с угловой скоростью $\omega$ за отрезок времени $\Delta t$ продольная ось вала $B$ займет положение $A_1A_1$, совершив поворот на угол $\omega\Delta t$. Казалось бы, при таком сложном движении центр шарика $D$ по прошествии времени $\Delta t$ должен был бы совместиться с точкой $b_1$ на окружности $a_1b_1c_1$, лежащей в плоскости $Q_1$, повернутой вокруг оси $CC$ относительно плоскости $Q$ на угол $\omega\Delta t$. Однако такого совмещения наблюдаться не будет. В самом деле, если предположить, что центр шарика $D$ совместится с точкой $b_1$, то это свидетельствовало бы о его выходе из плоскости $Q$ перво-

начального движения. Но для этого, как мы видели (см. рис. 18, *б*), было бы необходимо подействовать на шарик *D* внешним усилием, направленным вдоль продольной оси вала *B*.

Осуществить такое воздействие с помощью гибкой нити *OD* уже невозможно. Удерживая шарик *D* в радиальном направлении, нить *OD* не ограничивает его перемещения вдоль оси вала *B*. При одновременном вращении шарика вокруг осей *AA* и *CC* его

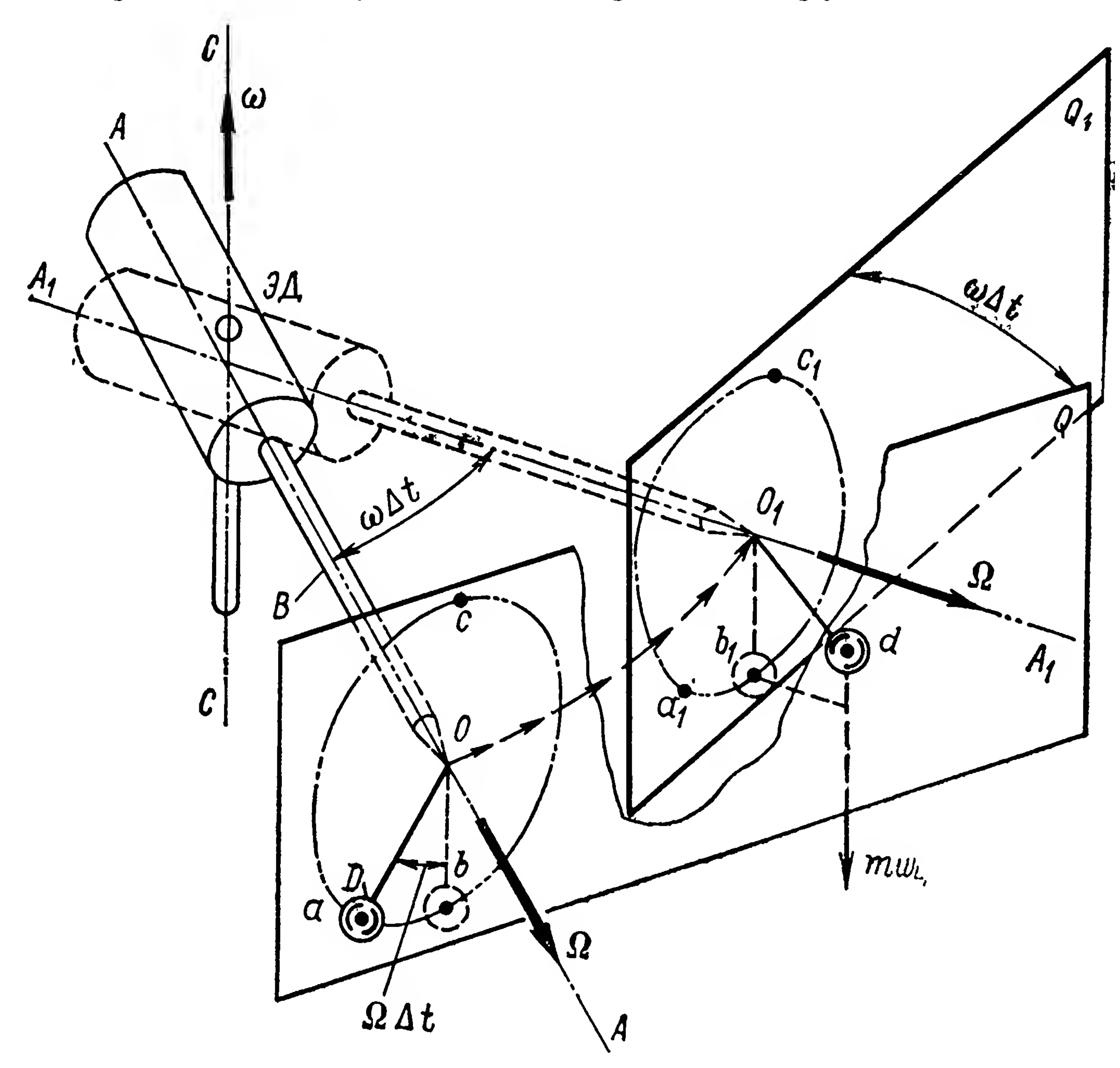



Рис. 20. Последовательные положения тела при его одновременном вращении вокруг двух осей

масса, стремясь в силу присущей ей инерции сохранить направление движения в плоскости *Q*, будет постепенно отклоняться от плоскости $Q_1$, перпендикулярной продольной оси вала *B*. Поэтому в тот момент, когда центр шарика *D* должен был бы совместиться с точкой $b_1$, находящейся в плоскости $Q_1$, он в действительности будет совмещен с точкой *d*, лежащей в плоскости *Q*.

Описанное сложное движение тела при одновременном вращении вокруг двух осей можно наблюдать на установке, показанной на рис. 21. Она состоит из электродвигателя, на горизонтальном валу которого закреплен матерчатый ротор. Корпус *K* двигателя смонтирован на основании, имеющем возможность вращаться вокруг вертикальной оси *CC*.

Сохраняя корпус *K* неподвижным, сообщим валу двигателя, а с ним и матерчатому ротору вращение вокруг оси *AA* с угловой скоростью Ω. Благодаря действию центробежных сил инер-

ции ротор приобретет значительную жесткость и будет вращаться в плоскости, строго перпендикулярной оси $AA$ (рис. 21, *а*). При приведении корпуса $K$ двигателя во вращение вокруг оси $CC$ ротор сразу же деформируется относительно оси $BB$, как это показано на рис. 21, *б*, подтверждая тем самым стремление каждой его материальной частицы сохранять первоначальное направление движения. Характерная форма изогнутого гибкого ротора наглядно показана на рис. 22.

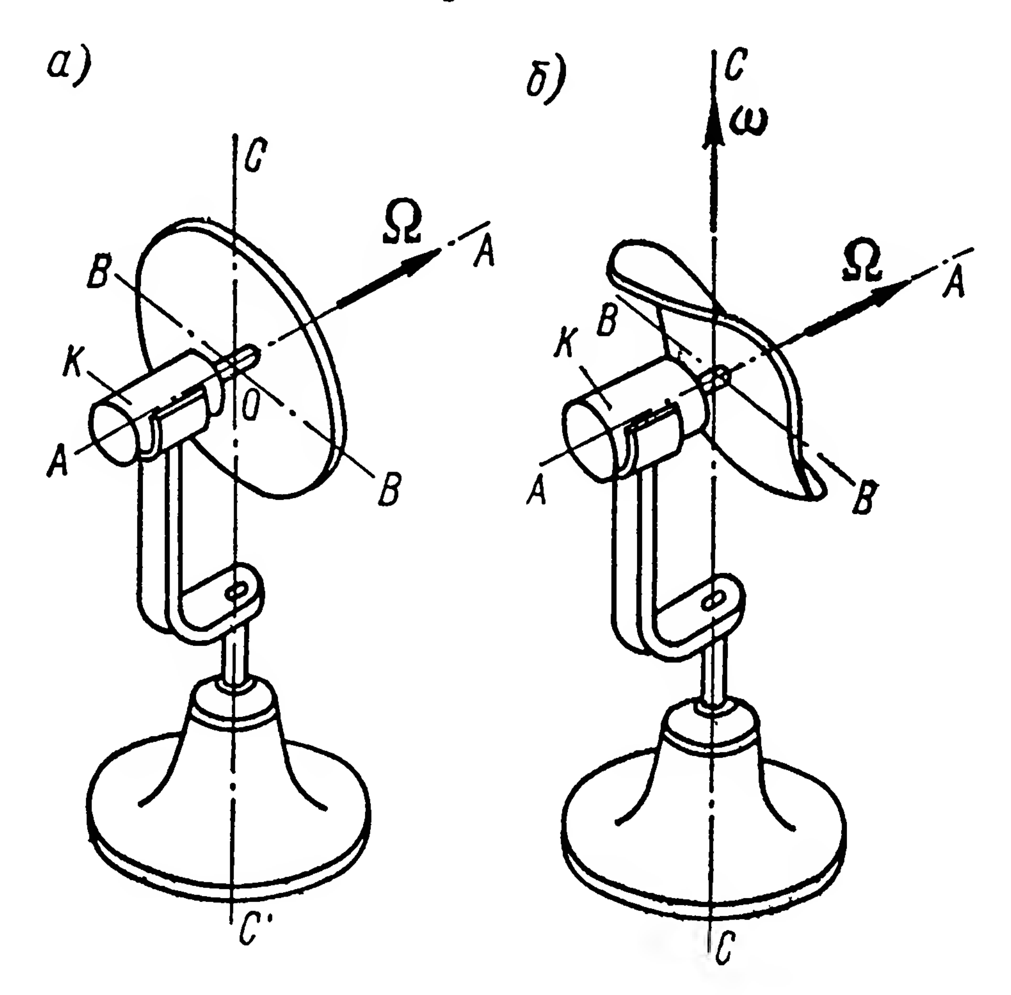



Рис. 21. Установка для демонстрации сложного движения матерчатого ротора: *а* — вращающийся двигатель неподвижен; *б* — двигатель одновременно вращается вокруг оси $CC$

Изгиб матерчатого ротора вокруг оси $BB$ (см. рис. 21), так же как и отклонение шарика $D$ от плоскости $Q_1$ (см. рис. 20), носят ограниченный характер. При вращении тела вокруг оси $AA$ на нить $OD$ действует центробежная сила инерции $mw_ц$, направленная от центра вращения $O$ параллельно плоскости окружности $a_1b_1c_1$ и численно равная произведению массы $m$ тела на его центростремительное ускорение $w_ц$. Как только шарик $D$ выйдет из плоскости $Q_1$, центробежная сила $mw_ц$ образует относительно точки $O_1$ момент, стремящийся вернуть шарик вновь в плоскость $Q_1$. Этот момент, значение которого с увеличением отклонения шарика $D$ от плоскости $Q_1$ возрастает, будет ограничивать свободу его перемещения вдоль оси вала $B$ и в конечном итоге заставит шарик поворачиваться вместе с плоскостью $Q_1$ вокруг оси $CC$. Иными словами этот момент заставит его двигаться с ускорением, направленным вдоль оси вращения вала. Такое ускорение, называемое поворотным или кориолисовым*, будем обозначать через $w_п$.

* В честь французского ученого Г. Кориолиса (1792—1843).

Для определения поворотного ускорения рассмотрим процесс одновременного вращения тела $D$ вокруг двух осей: оси $OA$ с

Рис. 22. Изгиб матерчатого ротора

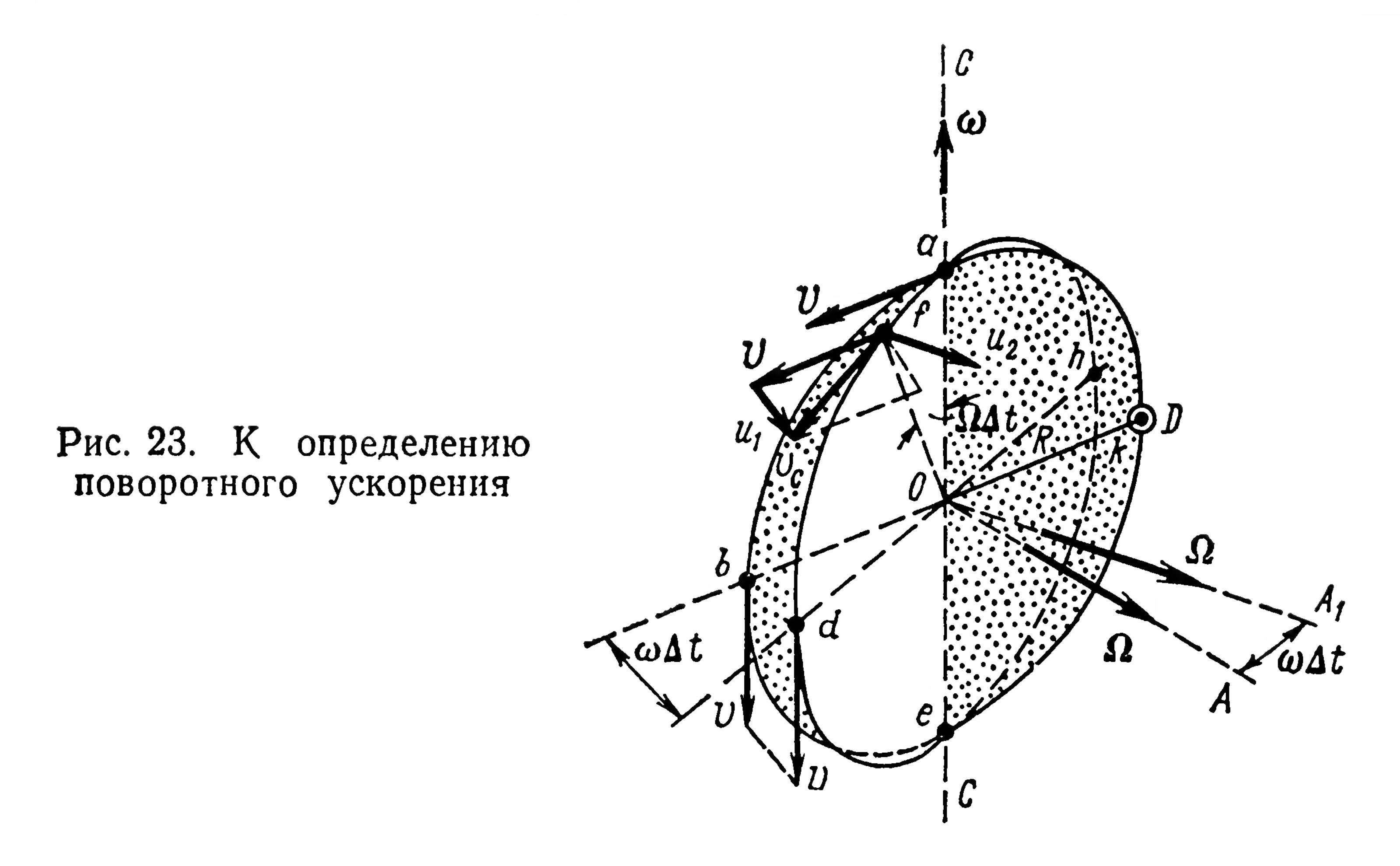



Рис. 23. К определению поворотного ускорения

угловой скоростью $\Omega$ и оси $CC$ с угловой скоростью $\omega$ (рис. 23). Проследим за перемещением шарика начиная с момента совмещения его центра с точкой $a$ на окружности $abe$, ограниченная которой плоскость выделена точками. В это мгно-

вение тело $D$, удаленное на расстояние $R$ от оси вращения $OA$, обладает окружной скоростью $v = \Omega R$, вектор которой направлен по касательной к окружности $abe$ в точке $a$ и совмещен с плоскостью $Oab$. Совершив сложное движение, тело $D$ по прошествии времени $\Delta t$ переместится не только по дуге окружности радиуса $R$ на величину угла $\Omega\Delta t$, но и совершит поворот вокруг оси $CC$ на угол $\omega\Delta t$. В момент времени $\Delta t$ его центр займет положение, совпадающее с точкой $f$. В последней тело будет обладать скоростью $v_c = v$, вектор которой будет лежать в плоскости $Oad$, составляющей с плоскостью $Oab$ угол $\omega\Delta t$.

Скорость $v_c$ представляет, в сущности, развитие первоначальной скорости $v$, получившей некоторое приращение. Для определения последнего перенесем вектор скорости $v$ параллельно самому себе в точку $f$ и построим параллелограмм скоростей, диагональю которого будет вектор результирующей скорости $v_c$. Нетрудно заметить, что вектор $u_1$ и характеризует ту дополнительную скорость, которая была сообщена телу $D$ за время $\Delta t$.

При бесконечно малом значении последнего угол $\omega\Delta t$ будет также мал, в связи с чем длину вектора скорости $u_1$ можно геометрически полагать равной длине дуги окружности, которая проведена из точки $f$ радиусом, равным длине вектора $v$:

$$u_1 = v\omega\Delta t.$$

Перемещаясь по дуге $af$, тело будет удаляться от оси $CC$. В момент времени $\Delta t$ при малой величине угла поворота $\Omega\Delta t$ расстояние тела $D$ от оси $CC$ можно определить как путь, который проходит тело за время $\Delta t$ при движении со скоростью $v$:

$$af = v\Delta t.$$

Следовательно, находясь в точке $f$, тело $D$, которое вращается вокруг оси $CC$ с угловой скоростью $\omega$, кроме скорости $v_c$ будет обладать еще и скоростью

$$u_2 = af\omega = v\omega\Delta t.$$

Сумма скоростей $u_1$ и $u_2$ является той общей дополнительной скоростью, которая за время $\Delta t$ была сообщена телу в процессе его одновременного вращения вокруг осей $OA$ и $CC$. Найдя отношение указанного приращения скорости ко времени $\Delta t$, мы и определим значение поворотного ускорения:

$$w_п = \frac{u_1 + u_2}{\Delta t} = \frac{v\omega\Delta t + v\omega\Delta t}{\Delta t} = 2v\omega. \qquad (2)$$

Из рис. 23 видно, что чем короче промежуток времени $\Delta t$, тем меньше угол $\omega\Delta t$ между последовательными положениями осей $OA$ и $OA_1$. В пределе, когда угол $\omega\Delta t$ будет близок к нулю, направление векторов обеих дополнительных скоростей $u_1$ и $u_2$ будут стремиться совпасть и, в конце концов, они станут параллельными оси $OA$. Следовательно, и поворотное ускорение $w_п$, тела $D$, находящегося в точке $a$, будет направлено вдоль оси $OA$,

С таким же по величине, но противоположно направленным ускорением $w_п$ движется тело $D$ и при совмещении его центра с точкой $e$ окружности $ade$. Но при достижении на ней точек $d$ и $h$ ускорение $w_п$ тела $D$ снижается до нуля, так как в эти мгновения вектор его окружной скорости $v$ становится параллельным вектору угловой скорости ω. Действительно, при указанном условии угловая скорость ω не вызывает изменений окружной скорости $v$, поскольку в точках $b$ и $d$, так же как и в точках $k$ и $h$, направления вектора скорости $v$ не претерпевают изменений.

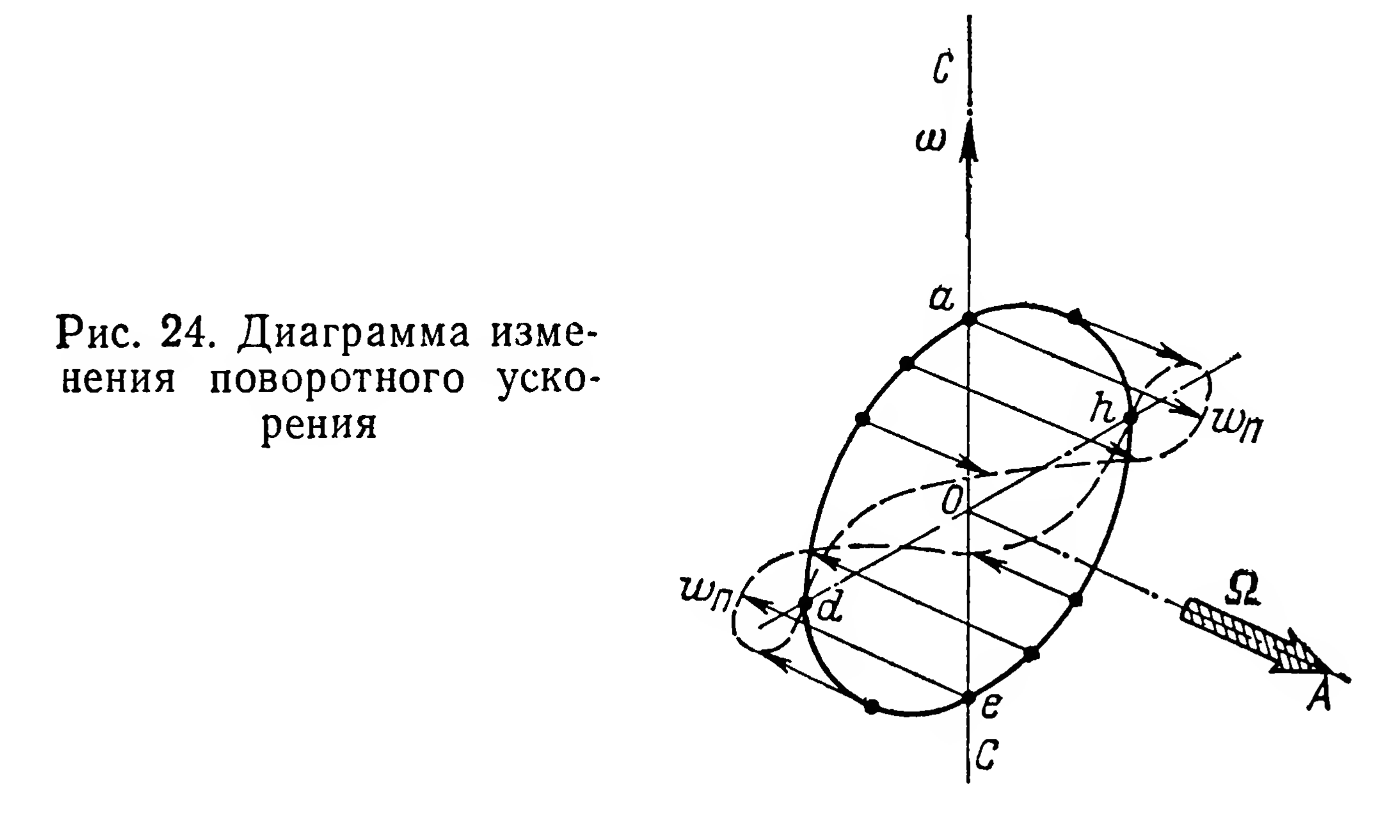



Рис. 24. Диаграмма изменения поворотного ускорения

Определив значение и направление поворотного ускорения в каждой точке окружности, по которой перемещается тело $D$ при его вращении вокруг оси $OA$, и отложив в выбранном масштабе значения $w_п$ на графике, изображенном на рис. 24, получим диаграмму изменений поворотного ускорения в зависимости от угла $\Omega\Delta t$ поворота тела. На диаграмме наглядно показано, что ускорение $w_п$ достигает максимума в точках $a$ и $e$ и равно нулю в точках $d$ и $h$, в которых изменяется направление его вектора.

## 10. Момент гироскопической реакции

Тело будет двигаться с поворотным ускорением $w_п$, равно как и с любым другим ускорением, только в том случае, когда на него действует внешнее усилие. В этом легко убедиться на опыте с использованием поворотного стенда, изображенного на рис. 25. На стенде установлены два шкива, соединенные между собой круглым туго натянутым резиновым ремнем. Для отклонения такого ремня от плоскости шкивов требуется значительное усилие, которое должно быть направлено вдоль осей их вращения. Это усилие можно сравнительно легко измерить динамометром, установленным на поворотном столе.

Сохраняя стол неподвижным, приведем шкивы во вращение с помощью установленного на нем электродвигателя. Ремень,

как показано на рис. 26, *а*, начнет перемещаться вдоль стола со скоростью $v$. Опыт подтверждает также и тот факт, что перемещение ремня происходит строго в плоскости шкивов. Но достаточно сообщить столу вращение вокруг вертикальной оси со скоростью $\omega$ (рис. 26, *б*), чтобы картина изменилась. Ветви ремня отклоняются теперь в горизонтальной плоскости во взаимно противоположных направлениях. Объясняется это тем, что при перемещении ремня со скоростью $v$ вдоль стола, вращающегося

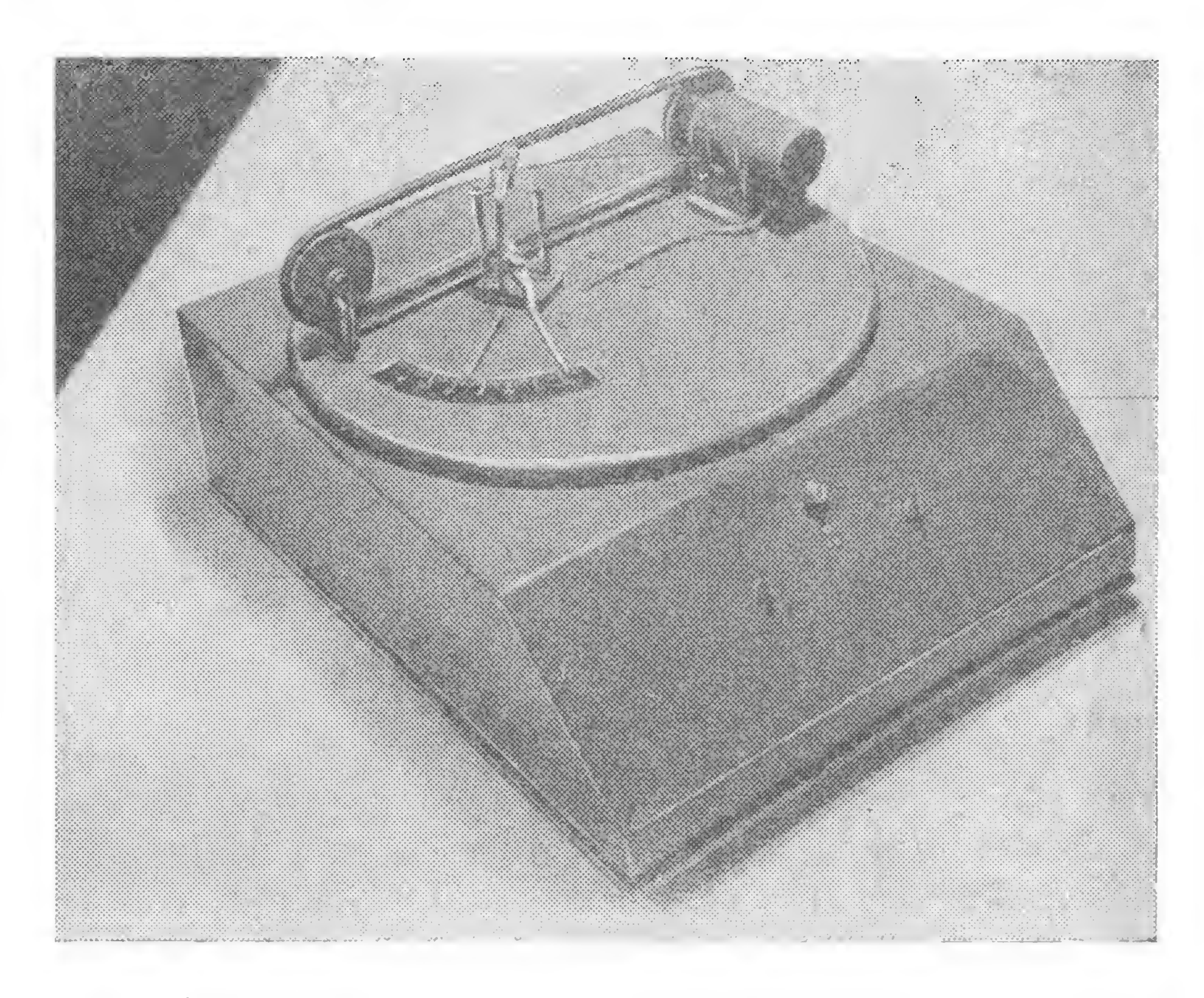


Рис. 25. Стенд для демонстрации сил инерции, возникающих при поворотном ускорении

со скоростью $\omega$ вокруг вертикальной оси, материальные частицы, составляющие тело ремня, перемещаются под действием поворотного ускорения. В силу присущей им инерции частицы, стремясь сохранить прежнее направление движения, начинают отклоняться от вертикальной плоскости вращения шкивов и растягивают ремень в горизонтальной плоскости.

При растяжении последнего возникают силы упругости, стремящиеся вернуть отклонившиеся частицы в плоскость вращения шкивов. Указанные силы, обусловленные упругостью материала ремня, и будут преодолевать силы инерции. Для большей убедительности опыта вертикальная ось вращения стола, как показано на рис. 26, *а*, смещена от плоскости шкивов на величину *е*. Это призвано наглядно показать, что прогиб ветвей ремня вызывается отнюдь не центробежными силами инерции.

В случае если бы последние порождали рассматриваемый прогиб ремня, обе его ветви изогнулись бы в одном направле-

нии, так как они смещены относительно вертикали на одну и ту же величину $e$. Отсюда очевидно, что изгиб ветвей ремня происходит вследствие инерции массы его материальных частиц, сопротивляющихся движению, обусловленному поворотным ускорением. Для подтверждения сказанного достаточно изменить направление вращения стола или шкивов. При этом меняются направления как поворотного ускорения отдельных частиц ремня, так и изгиба его ветвей. Если первоначально верхняя ветвь ремня изгибалась в горизонтальной плоскости вправо от век-

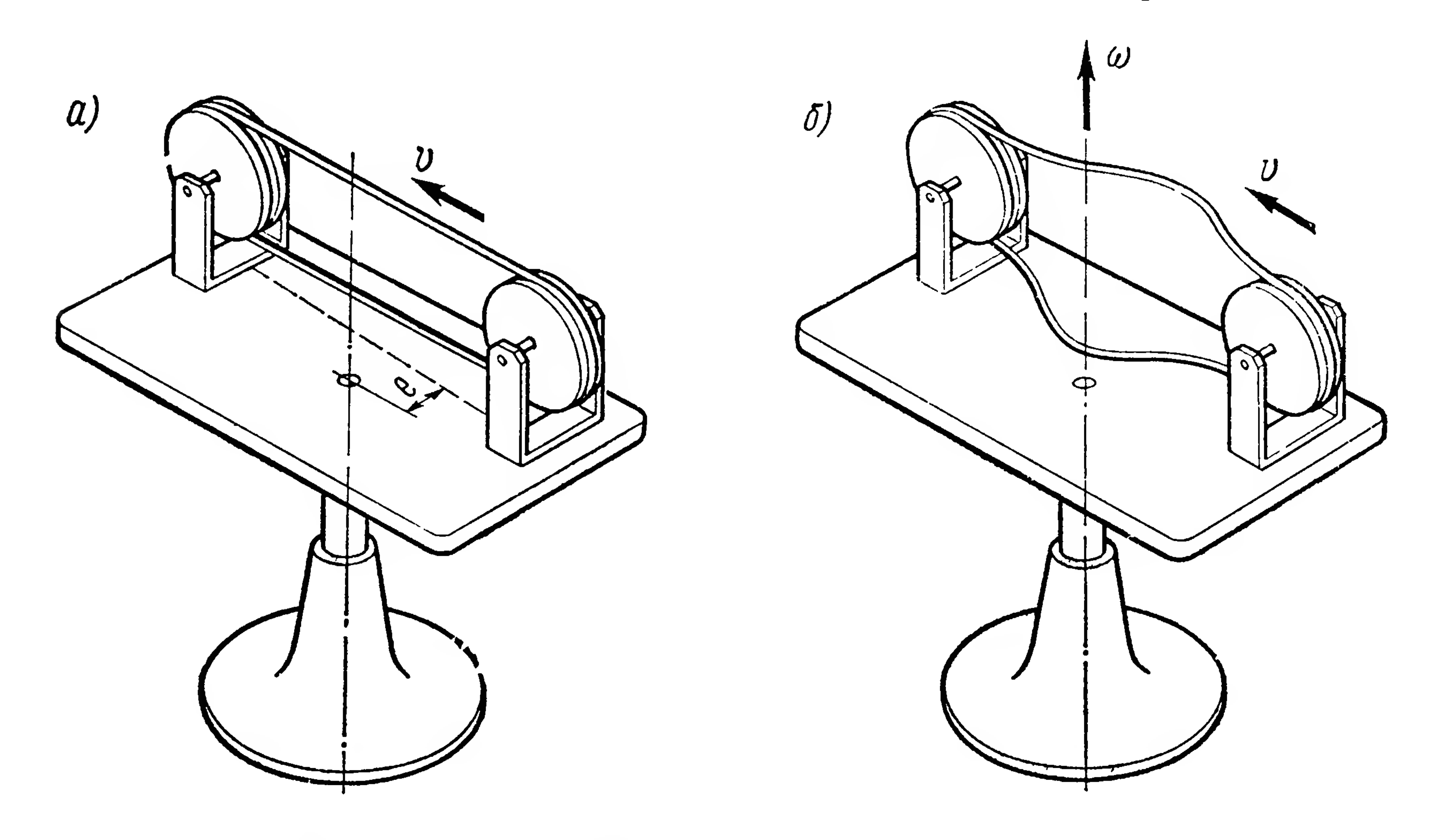



Рис. 26. Изгиб ремня при поворотном ускорении

тора $v$, а нижняя влево (рис. 26, *б*), то теперь направления их изгиба изменятся на обратные.

Опыты показывают, что при сообщении телу поворотного ускорения возникают противодействующие силы инерции, пропорциональные его массе. Последние могут иметь существенное значение при работе механизмов, машин и проборов. При больших вращающихся массах величина указанной силы сопротивления может оказаться достаточной даже для разрушения отдельных узлов.

Детали большинства машин в процессе их работы совершают одновременное вращение относительно двух пересекающихся осей. Для определения возникающих при этом сил сопротивления обратимся к рис. 27, на котором представлен ротор, установленный на подшипниках $L$ и $N$ в корпусе $K$. Если такой ротор привести во вращение вокруг оси $AA$ с угловой скоростью $\Omega$, а его корпус $K$ — вокруг оси $CC$ со скоростью $\omega$, то материальные частицы ротора будут двигаться с поворотным ускорением, значение которого для каждой частицы будет разным. Действительно, окружную скорость $v_i$ любой точки $a$ ротора можно разложить на две составляющие: $v_{Ci}$ — вдоль оси $CC$ и $v_{Bi}$ — вдоль оси

$BB$. Наличие у каждой отдельной частицы скорости $v_{Bi}$ и порождает ее движение с поворотным ускорением.

Положение любой выбранной точки $a$ в теле ротора определяется ее расстоянием $\rho_i$ от оси $AA$ и $l_i$ от оси $BB$. Исходя из

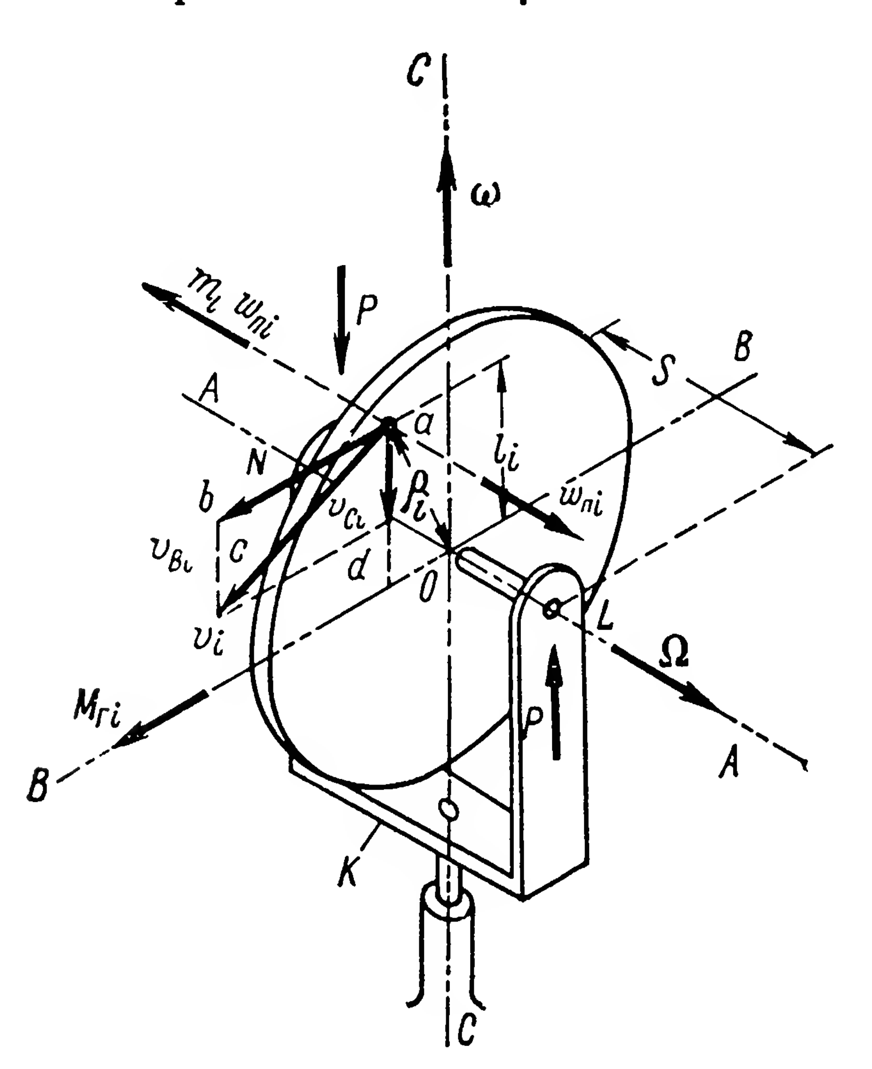



Рис. 27. К определению момента гироскопической реакции

подобия треугольников $abc$ и $adO$, обусловленного взаимной перпендикулярностью их сторон, можем записать отношение

$$\frac{ab}{bc} = \frac{ad}{aO};$$

заменив входящие в него величины геометрическими отрезками, получим

$$\frac{v_{Bi}}{v_i} = \frac{l_i}{\rho_i}.$$

В результате приходим к формуле

$$v_{Bi} = v_i \frac{l_i}{\rho_i}.$$

При вращении ротора вокруг оси $AA$ с угловой скоростью $\Omega$ окружная скорость $v_i$ любой его точки будет равна произведению $\Omega\rho_i$. В соответствии с этим мы можем записать

$$v_{Bi} = \Omega\rho_i \frac{l_i}{\rho_i} = \Omega l_i.$$

Зная скорость $v_{Bi}$ выбранной точки ротора, можно по формуле (2) определить величину поворотного ускорения этой точки

$$w_{пi} = 2v_{Bi}\omega = 2\Omega\omega l_i.$$

Масса $m_i$ материальной частицы, расположенной вблизи выбранной точки ротора, при его сложном движении будет вызы-

вать появление силы сопротивления, определяемой силой инерции

$$m_i w_{\text{п}i} = 2m_i \Omega \omega l_i.$$

Последняя будет направлена противоположно поворотному ускорению $w_{\text{п}i}$. Будучи приложенной на плече $l_i$ относительно оси $BB$, она создает момент

$$M_{\text{г}i} = m_i w_{\text{п}i} l_i = 2m_i \Omega \omega l_i^2,$$

который известен как момент гироскопической реакции и измеряется в ньютонах-метрах (Н·м).

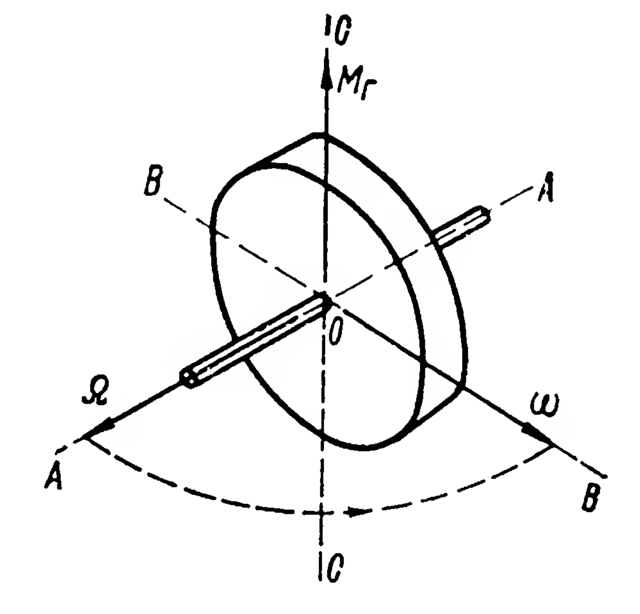



Рис. 28. Принцип определения направления действия гироскопического момента

Если общее количество материальных частиц, составляющих тело ротора, равно $n$, то суммарный момент гироскопической реакции можно определить по формуле

$$M_{\text{г}} = 2\Omega\omega\left(m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2 + \ldots + m_n l_n^2\right).$$

Величина $2\left(m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2 + \ldots + m_n l_n^2\right)$ называется моментом инерции ротора относительно оси его собственного вращения и измеряется в килограммах-метрах в квадрате (кг·м²). Обозначив его буквой $I$, перепишем последнее равенство в виде:

$$M_{\text{г}} = I\Omega\omega. \qquad (3)$$

Момент гироскопической реакции $M_{\text{г}}$, значение которого можно вычислить по формуле (3), создает на подшипниках $L$ и $N$ дополнительную нагрузку. Указанная нагрузка измеряется в ньютонах (Н) и в зависимости от расстояния $S$ между подшипниками определяется равенством

$$P = \frac{M_{\text{г}}}{S} = \frac{I\Omega\omega}{S}. \qquad (4)$$

При практическом использовании момента гироскопической реакции существенное значение имеет не только величина, но и направление его действия. Этот момент, который для краткости принято называть гироскопическим, как бы стремится повернуть ротор вокруг оси $BB$ таким образом, чтобы его ось $AA$ кратчайшим путем совместилась с осью $CC$ вынужденного поворота.

Для определения направления гироскопического момента существует следующее правило: *при сообщении ротору, вращающемуся с угловой скоростью Ω вокруг оси АА, дополнительного вращения с угловой скоростью ω вокруг какой-либо другой, перпендикулярной первой, оси возникнет гироскопический момент $M_г$, вектор которого перпендикулярен векторам обеих скоростей Ω и ω и направлен в ту сторону, откуда совмещение вектора Ω по кратчайшему пути с вектором ω будет казаться происходящим против часовой стрелки.* Сказанное иллюстрирует рис. 28.

## 11. Нутация и прецессия гироскопа

Как было показано выше (см. рис. 27), принудительный поворот ротора вокруг оси, перпендикулярной вектору угловой скорости Ω его собственного вращения, приводит к возникновению

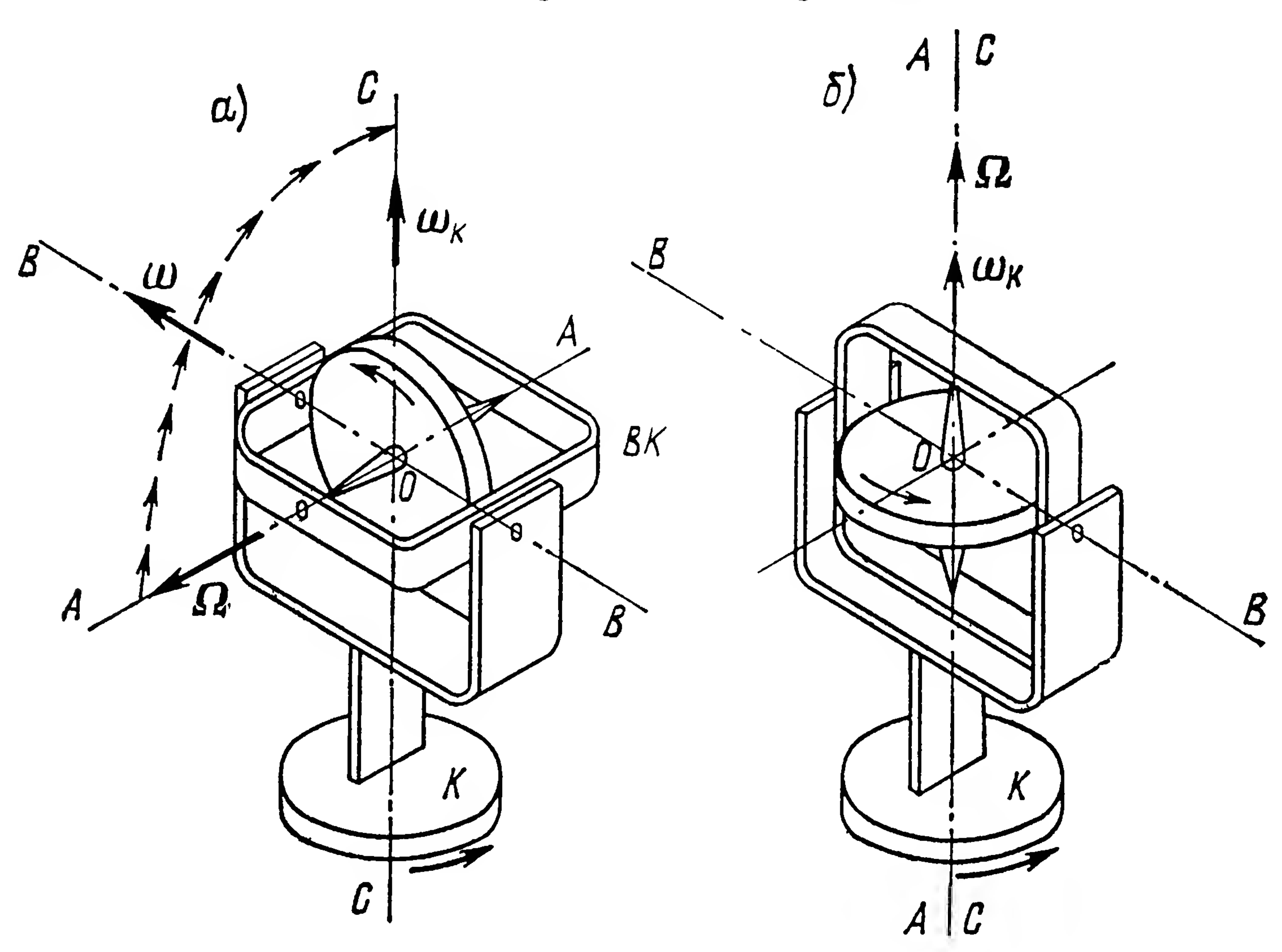


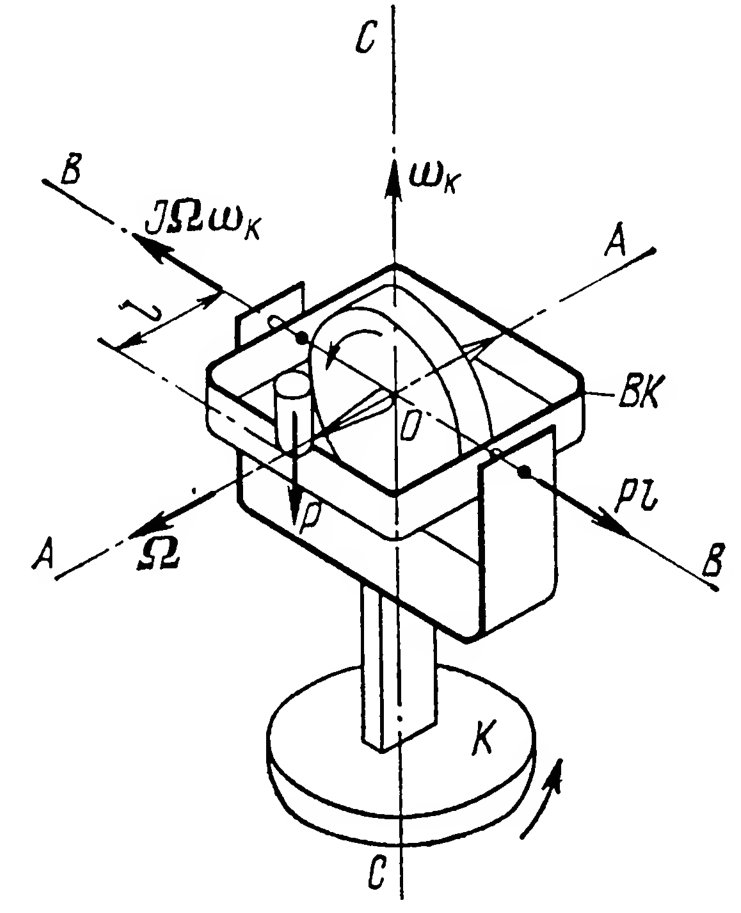

Рис. 29. Движение гироскопа при вынужденном повороте: *а* — положение ротора до поворота относительно оси *ВВ*; *б* — положение ротора и ориентация векторов угловых скоростей после поворота

гироскопического момента, порождающего дополнительные нагрузки на опоры главной оси. Обратимся к рис. 29, *а* и рассмотрим, как изменится характер движения гироскопа, если его ротор поместить в карданово кольцо *ВК*, обладающее свободой вращения вокруг оси *ВВ*, которая находится в корпусе *К*.

Сообщим ротору такого гироскопа вращение вокруг оси *АА* с угловой скоростью Ω, поворачивая одновременно его корпус *К* вокруг оси *СС* с угловой скоростью $\omega_К$. Ротор в нашем случае не обладает свободой поворота вокруг оси *СС*, поэтому он будет вынужден вращаться вокруг нее вместе с корпусом *К*. При

таком повороте ротор, стремясь в силу инерции перемещать материальные точки своего тела в первоначальном направлении, начнет поворачиваться вокруг оси *BB*.

Это вращение будет происходить до тех пор, пока главная ось *AA* гироскопа не совместится с осью *CC* его вынужденного поворота, что и иллюстрирует рис. 29, *б*. Именно в это мгновение векторы угловых скоростей $\Omega$ и $\omega_K$ совпадут по направлению, что и устранит причину, вызывающую поворот ротора вокруг оси *BB*. В рассматриваемом случае поворот ротора, а также давление, испытываемое подшипниками *N* и *L* (см. рис. 27), совпадают по направлению. В обоих случаях вектор угловой скорости $\Omega$ стремится совместиться с осью *CC* вынужденного поворота по кратчайшему расстоянию. В случае, изображенном на



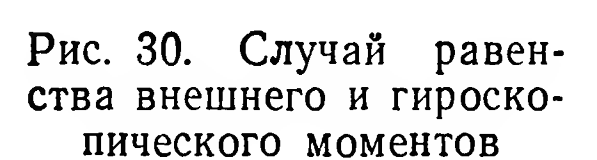


Рис. 30. Случай равенства внешнего и гироскопического моментов

рис. 29, *б*, главная ось *AA* пойдет на совмещение с осью *CC* путем вращения вокруг оси *BB* с угловой скоростью $\omega$. Вектор последней должен быть направлен по оси *BB* в такую сторону, чтобы совмещение осей *AA* с *CC* при наблюдении с конца вектора $\omega$ казалось происходящим против часовой стрелки, что и показано на рисунке.

В рассмотренном опыте поворот ротора вокруг оси *BB* можно было предотвратить. Для этого достаточно было, как показано на рис. 30, подвесить на внутреннее кольцо *BK* груз *P*, который на плече $l$ создал бы относительно оси *BB* момент $Pl$, равный по значению, но обратный по направлению гироскопическому моменту $I\Omega\omega_K$. Иными словами, должно быть обеспечено выполнение равенства

$$Pl = I\Omega\omega_K. \qquad (5)$$

При этом условии гироскопический момент, обусловленный массой ротора, погашается моментом внешней силы. Ротор гироскопа теперь не будет поворачиваться вокруг оси *BB*, сохраняя в течение всего опыта перпендикулярность оси *AA* плоскости *BOC* прибора.

Рассмотрим теперь, как подействует момент $Pl$ внешней силы P на гироскоп, обладающий свободой вращения вокруг всех трех осей его подвеса $AA$, $BB$ и $CC$, для чего обратимся к рис. 31. Предположим, что в начальный момент времени его главная ось $AA$ совпадает с осью $OD$, перпендикулярной плоскости $BOC$ (рис. 31, *а*), а произвольно выбранная на оси $AA$ точка $H$, называемая **полюсом гироскопа**, совмещена с точкой $e$.

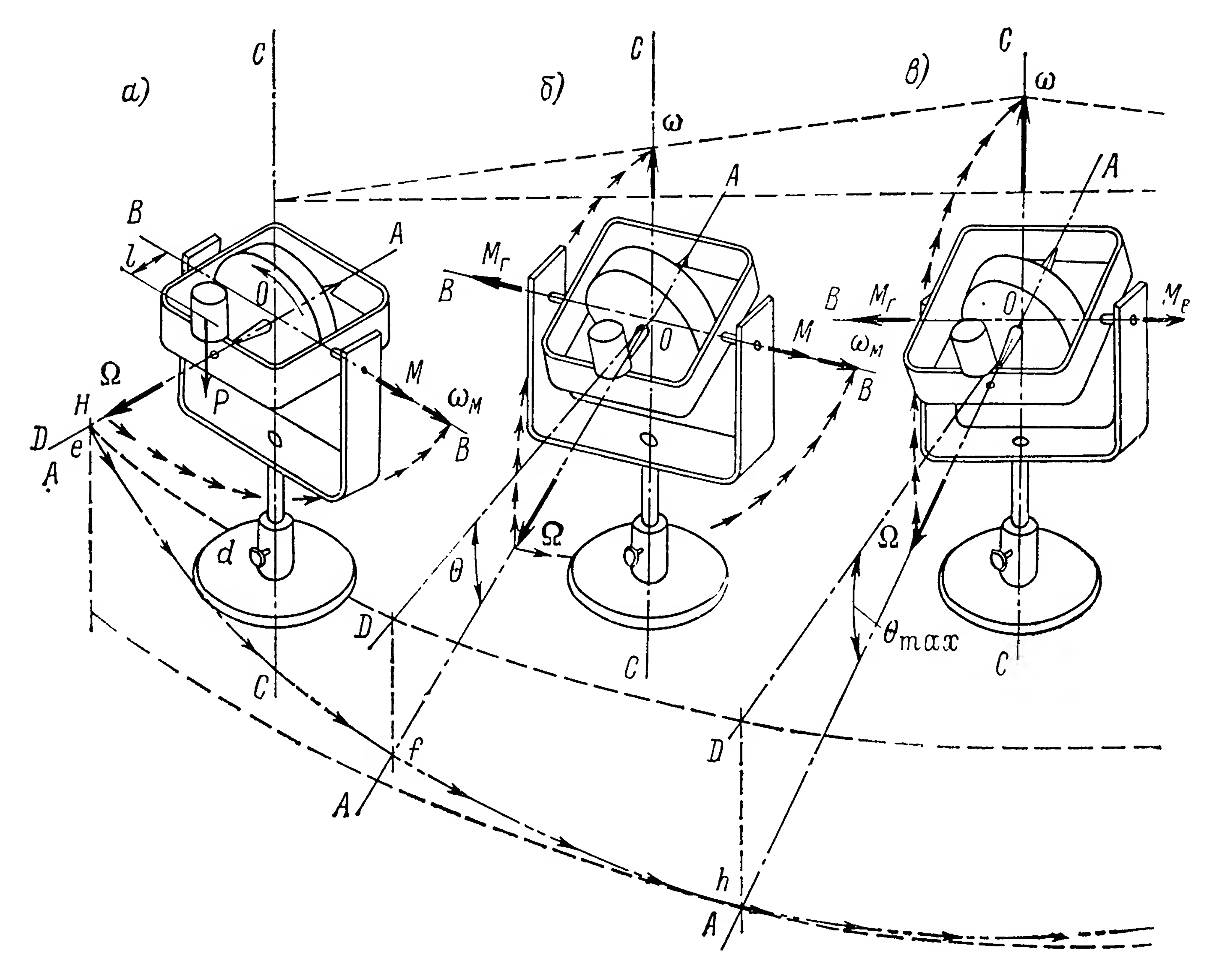


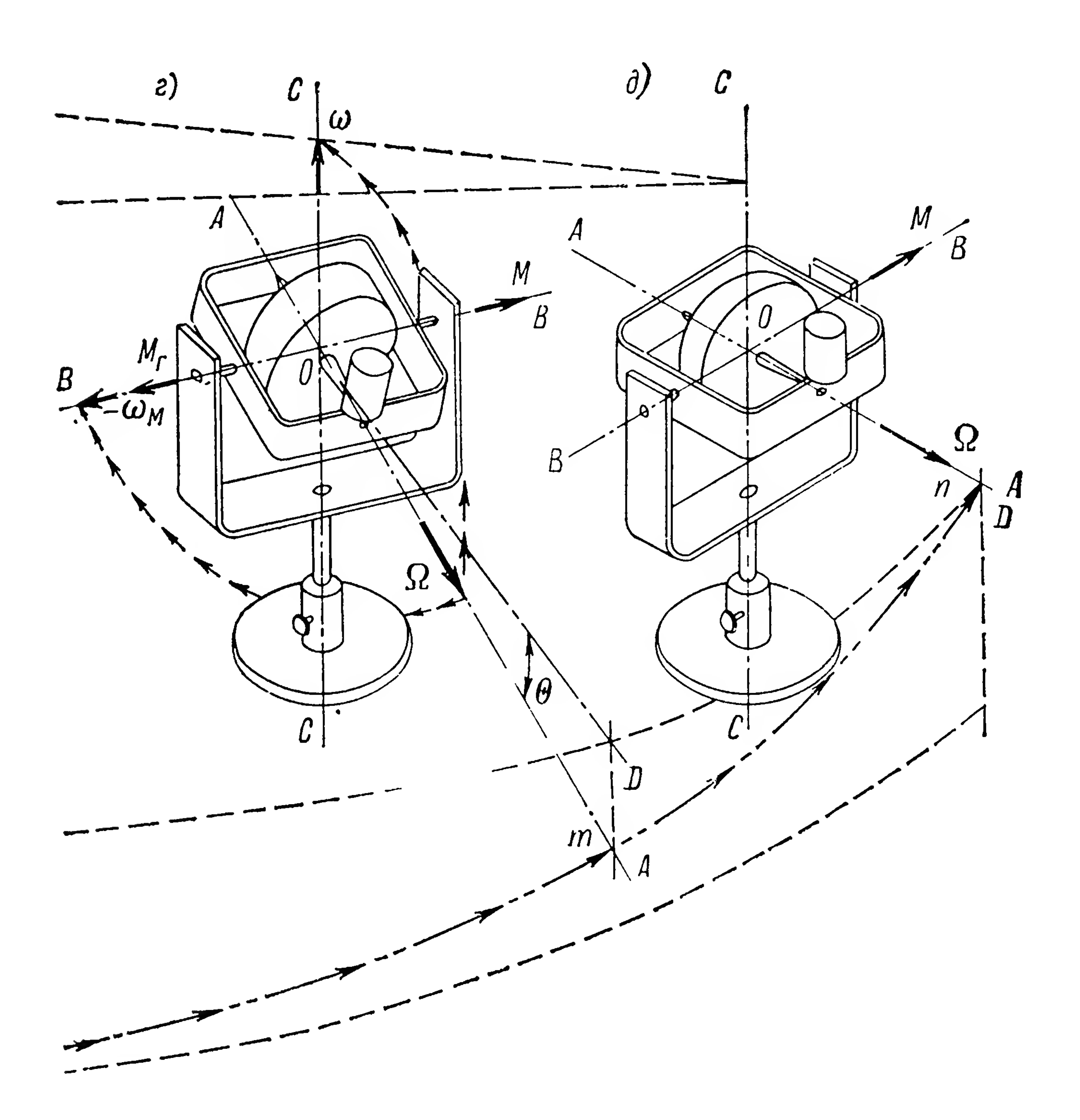

Рис. 31. К объяснению нутации и

С этого мгновения гироскоп под влиянием момента $M = Pl$ начнет двигаться с ускорением в направлении действия момента $M$ и тем самым поворачиваться вокруг оси $BB$ со все возрастающей угловой скоростью $\omega_м$.

С самого первого мгновения гироскоп, вращающийся вокруг осей $AA$ и $BB$ с угловыми скоростями $\Omega$ и $\omega_м$ соответственно, как было показано ранее, будет вынужден двигаться с поворотным ускорением. Ротор, сопротивляясь в силу присущей его массе инерции ускоренному движению, будет стремиться совместить по кратчайшему пути вектор угловой скорости $\Omega$ собственного вращения гироскопа с вектором угловой скорости $\omega_м$ его вынужденного поворота. Однако карданов подвес будет препятствовать совмещению осей $AA$ и $BB$, в связи с чем гироскоп нач-

нет поворачиваться вокруг оси *СС* с угловой скоростью ω (рис. 31, *б*). Указанный поворот гироскопа вокруг осей *ВВ* и *СС* будет способствовать непрерывному отклонению его полюса *Н* от точки *е*, происходящему одновременно как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

Чем большую угловую скорость $\omega_M$ приобретает гироскоп под влиянием момента *М*, тем большее поворотное ускорение, со-




прецессии гироскопа

гласно формуле (2), ему будет сообщаться и с тем большей угловой скоростью ω он будет поворачиваться вокруг оси *СС*. Но при одновременном вращении со скоростями Ω и ω сопротивление массы ротора вызовет появление гироскопического момента $M_г = I\Omega\omega$ относительно оси *ВВ*, который будет стремиться совместить векторы Ω и ω.

С увеличением угловой скорости ω гироскопический момент $M_г$ также будет расти, уменьшая значение суммарного момента $M - M_г$ относительно оси *ВВ*. В результате значение ускорения гироскопа при вращении вокруг этой оси начнет снижаться, уменьшая тем самым нарастание угловой скорости $\omega_M$. Когда ось *АА* составит с плоскостью *DOB* угол Θ и полюс *Н* совместится в пространстве с точкой *f*, угловая скорость ω достигнет значения,

при котором наступит равенство гироскопического $M_г$ и внешнего $M$ моментов:

$$M - M_г = Pl - I\Omega\omega = 0. \qquad (6)$$

С этого мгновения увеличение $\omega_M$ прекратится, и дальнейший поворот гироскопа вокруг оси $BB$ будет происходить с постоянной скоростью. Однако вследствие инерции гироскоп еще будет стремиться совместить векторы угловых скоростей $\Omega$ и $\omega_M$. Поэтому он будет продолжать поворот вокруг оси $CC$ с возрастающей скоростью $\omega$. С ростом последней будет увеличиваться и момент $M_г$, который будет все более превышать внешний момент $M$, в связи с чем угловая скорость $\omega_M$ начнет постепенно уменьшаться. И в то мгновение, когда $\omega_M$ станет равной нулю, ось $AA$ составит с плоскостью $DOB$ максимальный угол $\Theta_{max}$ (см. рис. 31, *в*), полюс $H$ совместится с точкой $h$ и угловая скорость $\omega$ достигнет своего максимального значения.

Как только поворот гироскопа вокруг оси $BB$ прекратится, исчезнет и причина его вращения вокруг оси $CC$. Однако последнее в течение некоторого времени по инерции будет еще продолжаться. Гироскопический момент $M_г$, превышающий теперь момент $M$ внешних сил, вновь вызовет поворот гироскопа вокруг оси $BB$, но уже в противоположном направлении с угловой скоростью $\omega_M$. В результате угловая скорость $\omega$ вращения гироскопа вокруг оси $CC$ начнет снижаться, уменьшая, в свою очередь, значение гироскопического момента $M_г = I\Omega\omega$.

Превышение момента $M_г$ над $M$ начнет убывать, и в некоторое мгновение их разность вновь станет равной нулю. В это время ось $AA$ опять образует с плоскостью $DOB$ угол $\Theta$ (рис. 31, *г*), в результате чего полюс $H$ гироскопа совместится с точкой $m$. С уменьшением $\omega$ падает и значение $I\Omega\omega$, превышение которого над моментом $M$ внешней силы $P$ начнет снижаться. Вследствие этого вращение с угловой скоростью $\omega_M$ будет замедляться. Через некоторое время угловые скорости $\omega_M$ и $\omega$ поворота гироскопа вокруг осей $BB$ и $CC$ будут равны нулю, и главная ось $AA$ вновь совместится с перпендикуляром $OD$ к плоскости $BOC$, а полюс $H$ гироскопа — с точкой $n$ (рис. 31, *д*). В это мгновение на гироскоп, как и в начальный момент времени (см. рис. 31, *а*), действует лишь момент $M$, вызывающий ускоренное его вращение вокруг оси $BB$. Рассмотренный выше цикл движения, таким образом, повторяется.

Очевидно, что при действии на гироскоп с тремя степенями свободы внешней силы $P$, создающей момент $M$ относительно внутренней оси $BB$, он начнет совершать вокруг нее колебания с переменной как по величине, так по направлению угловой скоростью $\omega_M$. Одновременно его ротор приобретет вращение вокруг наружной оси $CC$ с переменной по величине, но постоянной по направлению угловой скоростью $\omega$. В результате за один цикл рассматриваемого движения полюс $H$ гироскопа переместится в пространстве по кривой $efhmn$, причем направления $Oe$ и $On$

образуют между собой угол, характеризующий величину поворота гироскопа вокруг наружной оси $CC$ за время этого цикла. Из рисунка также видно, что $\omega$ возрастает от нуля до некоторого максимума, снижаясь затем снова до нуля. Поэтому за среднее значение угловой скорости $\omega$ может быть принята поло-

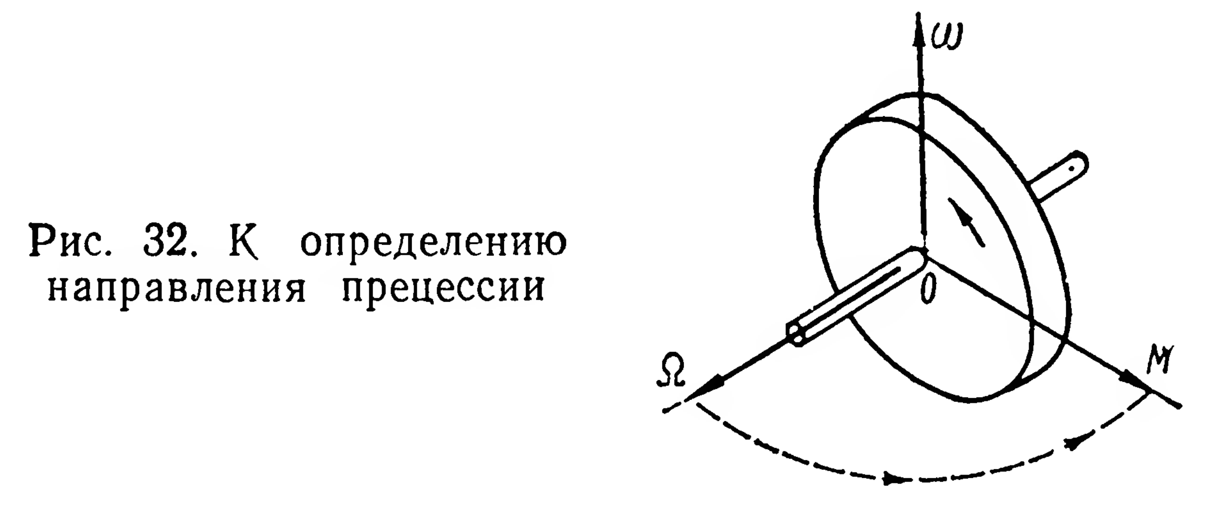


Рис. 32. К определению направления прецессии

вина ее максимального значения. Указанная средняя величина практически определяется из условия равенства моментов $M = Pl$ и $M_г = I\Omega\omega$ (рис. 31, *б* и *г*). На основании этого приходим к выражению

$$\omega = \frac{Pl}{I\Omega} = \frac{M}{I\Omega}. \tag{7}$$

Уравнение (7) отражает закон прецессионного движения, или, сокращенно, прецессии гироскопа, являющийся одним

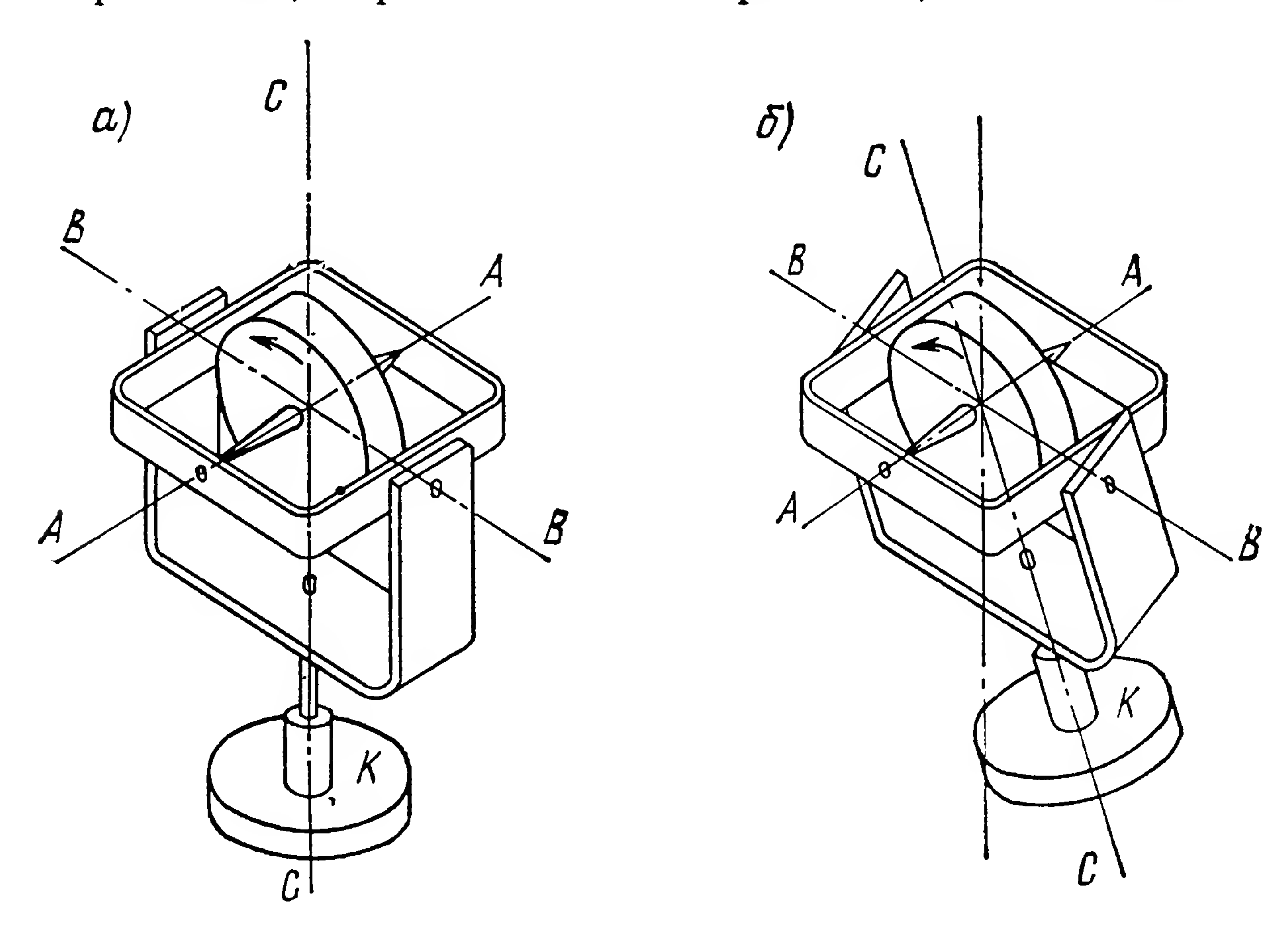


Рис. 33. Стабилизация главной оси гироскопа: *а* — ось $CC$ вертикальна; *б* — ось $CC$ отклонена от вертикали

из основных при изучении вопросов прикладного использования гироскопического эффекта. Прецессионное движение, как было показано, сопровождается так называемыми нутационными колебаниями гироскопа, для которых характерны весьма

малая амплитуда и очень высокая частота. В силу этого их невозможно различить невооруженным глазом, поскольку они воспринимаются обычно как мелкие вибрации работающего гироскопа.

В заключение отметим, что прецессия гироскопа происходит вокруг оси, перпендикулярной вектору момента $M$ внешней силы. При этом направление вектора угловой скорости $\omega$ прецессионного движения, как показано на рис. 32, таково, что совмещение векторов $\Omega$ и $M$ при наблюдении с конца вектора $\omega$ происходит против часовой стрелки.

Из уравнения (7) следует, что угловая скорость прецессии $\omega$ растет при увеличении момента $M$ и уменьшается при прочих равных условиях с увеличением кинетического момента $\Omega$ гироскопа. При отсутствии момента внешних сил угловая скорость прецессии равна нулю. Ориентация в пространстве главной оси $AA$ гироскопа, как явствует из рис. 33, остается при этом условии неизменной. Корпусу гироскопа в этом случае можно придавать большие углы наклона (рис. 33, *б*) и сообщать любые угловые скорости, но главная его ось $AA$ будет сохранять неизменным, или, как говорят, стабильным, первоначально заданное ей (рис. 33, *а*) направление в пространстве. Указанное свойство гироскопа широко используется в технике при необходимости обеспечить сохранение стабильности ориентации какого-либо устройства на изменяющей свое положение платформе.

* * *

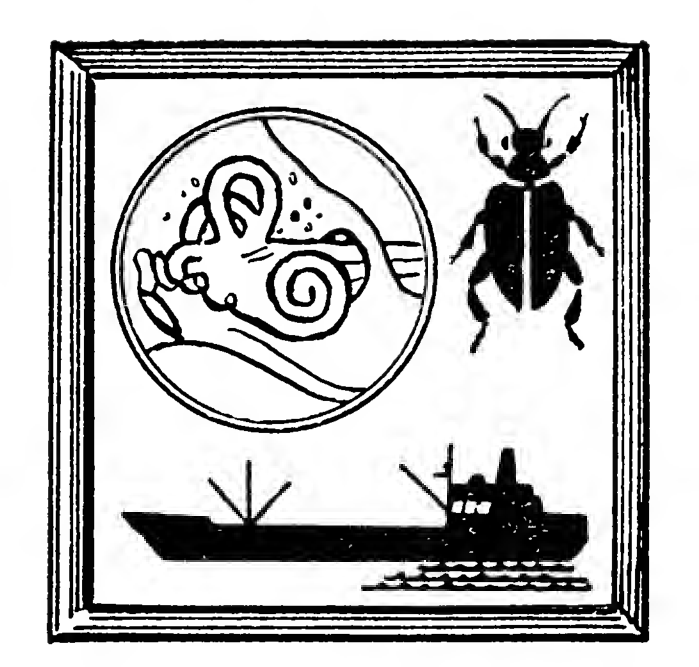
Еще в начале текущего столетия английский ученый Дж. Перри писал [32]: «...если бы глубокому исследованию поведения волчка было уделено большее внимание, то наши достижения в области технической механики и многих отраслей промышленности были бы более значительны». С тех пор прошло много времени, и изучение законов движения гироскопа стало самостоятельной быстро развивающейся отраслью научных знаний, оказывающей огромное влияние на современные достижения народного хозяйства.

Большой вклад внесли в науку о гироскопе русские ученые О. И. Сомов, Д. К. Бобылев, В. А. Стеклов, С. В. Ковалевская, Н. Е. Жуковский, А. С. Домогаров и многие другие. Ей посвятили свой труд и зарубежные ученые: француз Богер, немцы Клейн, Зоммерфельд, Шулер, Мартинсен, Граммель, англичане Гренхил, Грей, Роулингс и их последователи.

Наряду с теоретическими исследованиями проводились и практические работы по сообщению ротору максимально возможной скорости вращения вокруг главной оси $AA$ (см. рис. 16). Одновременно велись поиски возможностей создания таких условий, при которых вращение гироскопа вокруг осей $BB$ и $CC$ подвеса происходило бы с минимальным трением. Сложность решения этих проблем долгое время тормозила практическое исполь-

зование гироскопа. И только после того как в качестве привода ротора были использованы газовая турбина и электрический двигатель, а в качестве опор подвеса — шариковые подшипники, гироскопические приборы начали широко применяться в технике.

Особо интенсивное развитие гироскопическое приборостроение получило в нашей стране после Великой Октябрьской социалистической революции. Советские ученые А. Н. Крылов, Б. В. Булгаков, Е. Л. Николаи, Б. И. Кудревич, С. С. Тихменев, Г. О. Фридлендер, Г. А. Сломянский и многие их ученики и последователи своими работами создали прочную базу для практического использования гироскопа. Их творческое содружество с работниками отечественной промышленности обеспечило оснащение советских морских судов, лайнеров воздушного флота, а также космических кораблей высококачественными гироскопическими приборами и способствовало широкому внедрению гироскопов во многие отрасли нашего народного хозяйства.





# III

## ПРОЯВЛЕНИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

### 12. Гироскопический эффект в используемых человеком машинах и механизмах

С проявлениями гироскопического эффекта мы встречаемся в повседневной жизни столь часто, что во многих случаях даже не обращаем на него внимания. Вряд ли кто-нибудь задумывается над тем, почему при езде на велосипеде человек инстинктивно смещает тело в сторону желаемого поворота. А между

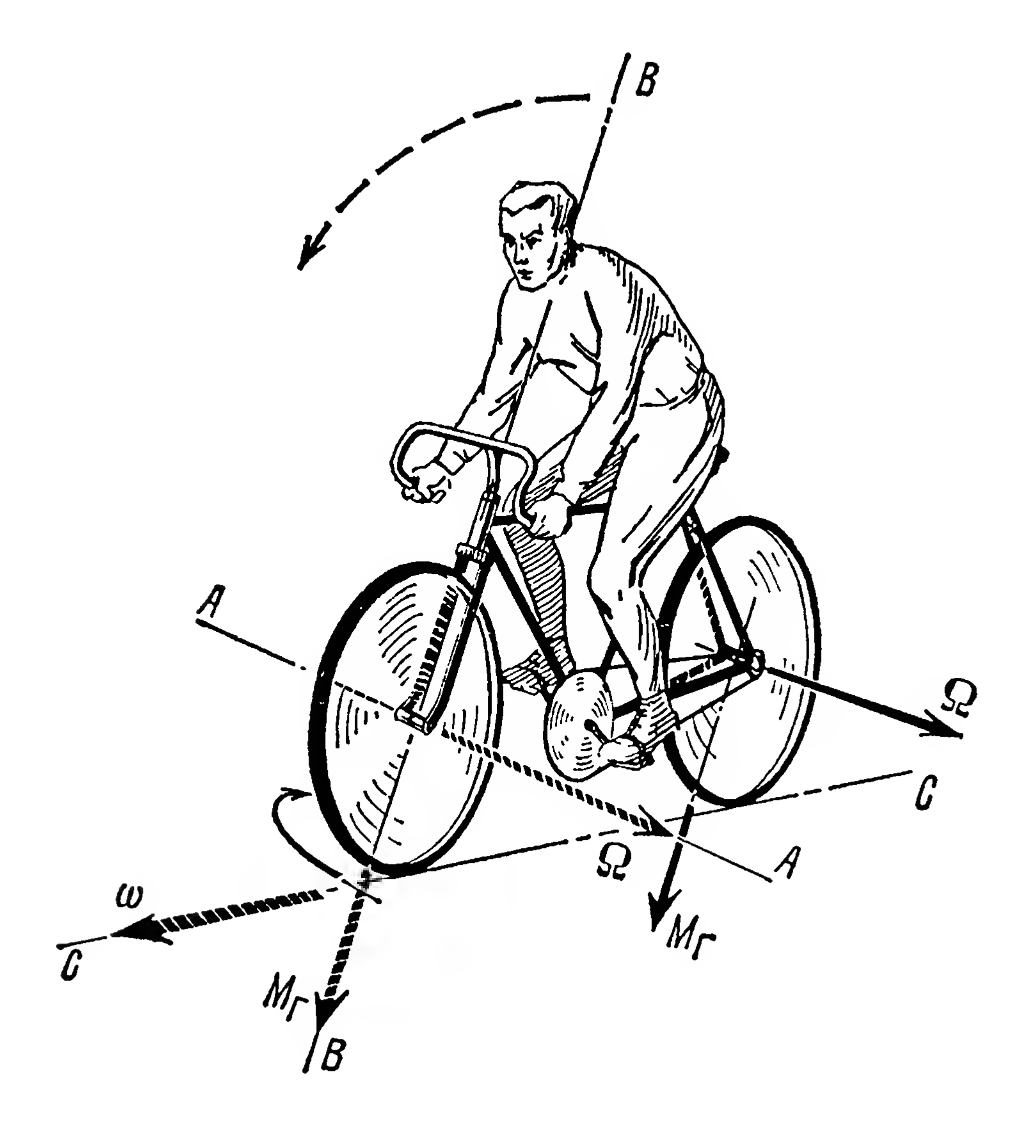



Рис. 34. Проявление гироскопического момента при езде на велосипеде

тем мы являемся здесь свидетелями практического использования гироскопического эффекта.

Действительно, предположим, что велосипедисту, изображенному на рис. 34, который движется в направлении *CC*, нужно произвести поворот в правую сторону. Изменив положение руля, он одновременно смещает центр тяжести своего тела, стремясь как бы «повалить» машину в сторону желаемого поворота.

Такое отклонение велосипеда от вертикали является по существу поворотом его вокруг оси $CC$, осуществляемым с некоторой угловой скоростью $\omega$. В этом повороте участвуют и оба велосипедных колеса, причем для них вращение со скоростью $\omega$ не единственное, так как при движении они вращаются еще и вокруг осей $AA$ с угловой скоростью $\Omega$. Вследствие этого, как только колесам будет сообщено принудительное вращение вокруг оси $CC$, возникнут гироскопические моменты, равные согласно формуле (3) произведению значения момента инерции $I$ колеса относительно оси $AA$ на значения обеих скоростей $\Omega$ и $\omega$ его вращательного движения.

Гироскопический момент, порождаемый массой заднего колеса, имеющего одну степень свободы в раме велосипеда, будет

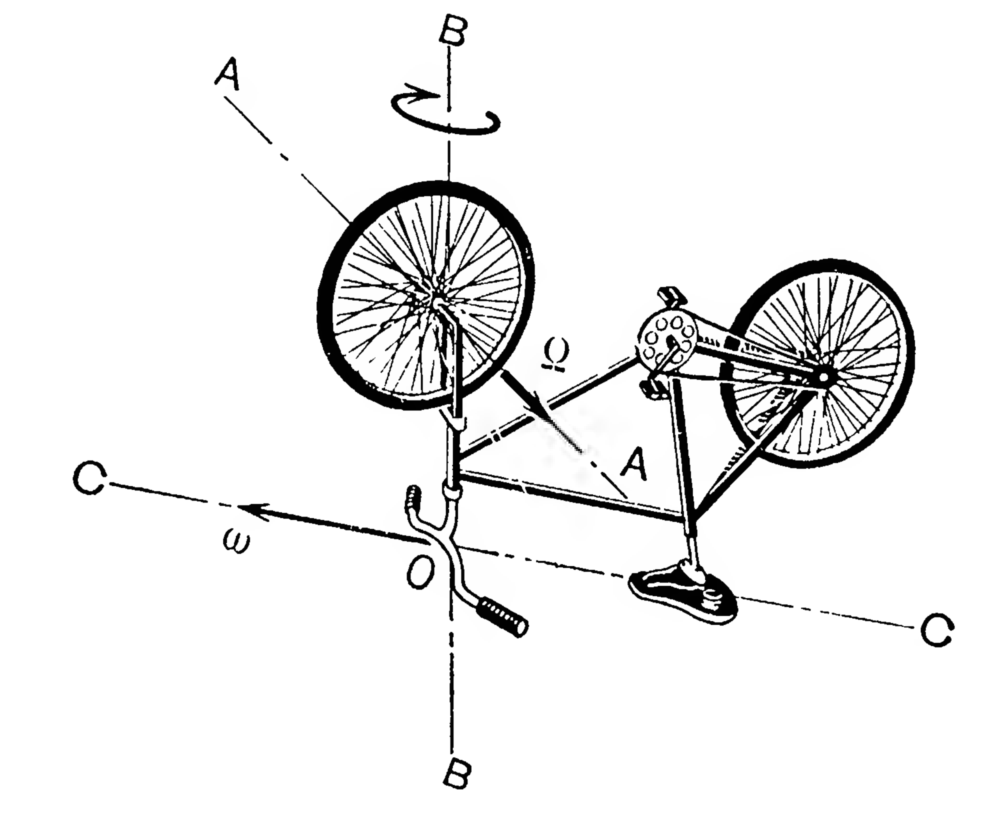



Рис. 35. Опыт с велосипедным колесом

погашен в подшипниках, жестко в ней закрепленных. Но поведение переднего колеса, имеющего свободу вращения в рулевой колонке вокруг оси $BB$, будет иным. Его масса, сопротивляясь изменению положения оси $AA$ относительно горизонтальной плоскости, вызовет поворот переднего колеса вокруг оси $BB$, в процессе которого ось $AA$ будет стремиться совместиться с осью $CC$. Как видим, гироскопический момент $M_г$ переднего колеса способствует осуществлению велосипедистом требуемого поворота.

Описанный эффект наиболее ощутим при езде на велосипеде, когда человек убирает руки с руля. Достаточно в этих условиях наклонить машину в ту или иную сторону, чтобы совершить требуемый поворот. В этом легко убедиться, даже не передвигаясь на велосипеде. Поставьте его на пол вверх колесами, как показано на рис. 35. Раскрутите переднее колесо вокруг оси $AA$ с некоторой угловой скоростью $\Omega$ и попробуйте сообщить раме велосипеда наклон относительно оси $CC$. Вы сразу же убедитесь в том, что переднее колесо почти мгновенно повернется вокруг оси $BB$ рулевой вилки на угол, равный 90°.

Не во всех случаях гироскопический момент играет положительную роль. Часто его проявление является даже нежелатель-

ным. Так, например, воздушный винт самолета, показанного на рис. 36, который обладает относительно оси $Ox$ значительным моментом инерции $I$, при вращении вокруг нее с угловой скоростью $\Omega$ развивает большой кинетический момент $I\Omega$. Всякий раз, когда самолет поворачивается вокруг поперечной $Oy$ или курсовой $Oz$ осей, массе винта приходится вращаться вокруг двух осей одновременно.

Поворот самолета вокруг оси $Oz$ (рис. 36, *а*) приводит к одновременному вращению винта вокруг осей $Ox$ и $Oz$ с угловыми скоростями $\Omega$ и $\omega$ соответственно. Такое его движение происходит с поворотным ускорением, порождающим сопротивле-

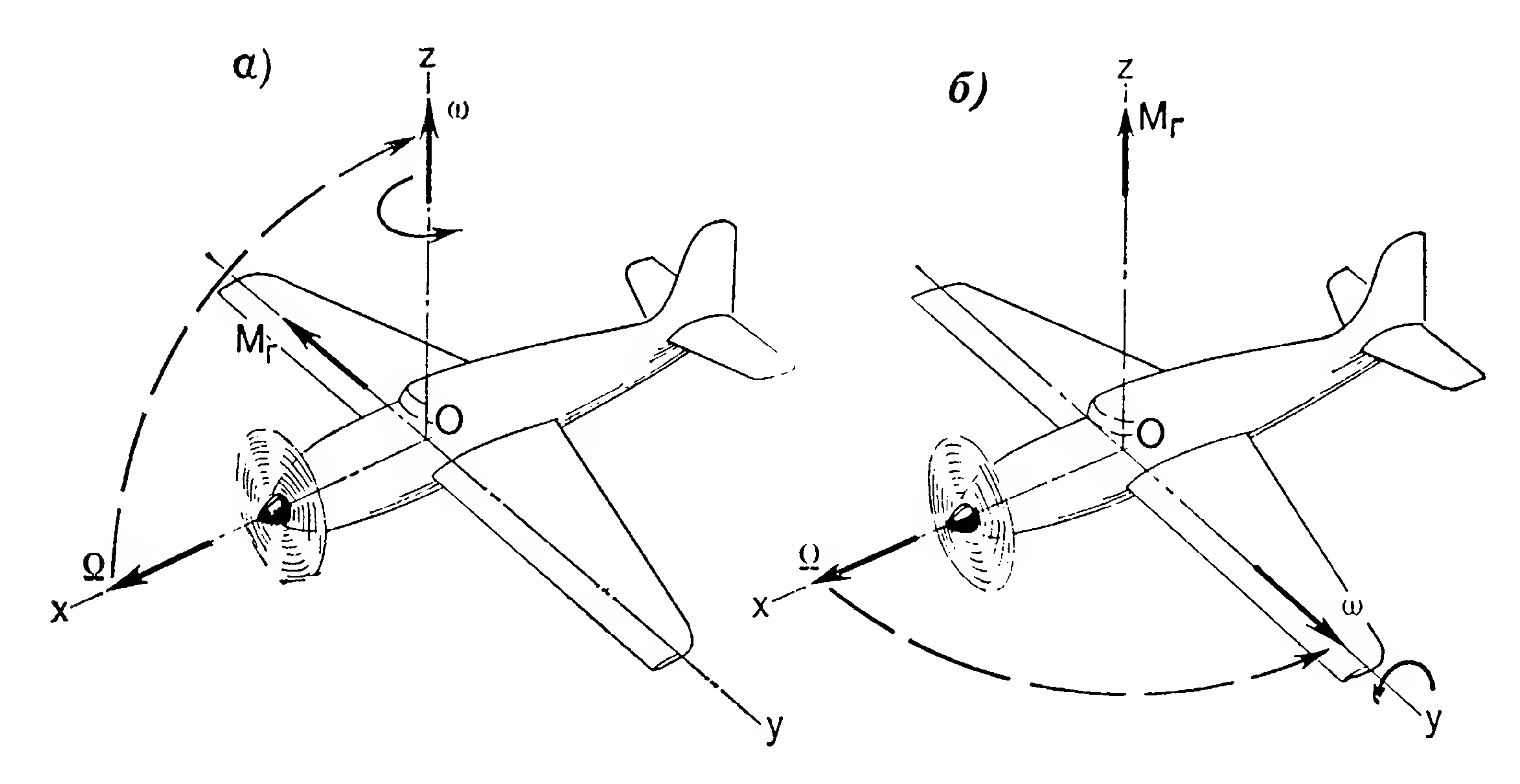



Рис. 36. Проявление гироскопического эффекта при поворотах самолета

ние ему, обусловленное массой винта. И до тех пор, пока летчик не погасит гироскопический момент $M_г = I\Omega\omega$ соответствующим поворотом рулей глубины, нос летательного аппарата будет стремиться подняться вверх. Если же разворот выполняется вправо, то инерция массы винта будет опускать нос самолета вниз.

При поворотах вокруг поперечной оси $Oy$ (рис. 36, *б*) в силу тех же причин нос самолета будет отклоняться в левую или правую сторону. Вот почему при поворотах самолета приходится применять дополнительные усилия на перемещение рулей управления с целью уравновесить гироскопические моменты, порождаемые инерцией воздушного винта.

На судах гироскопический момент может возникать при вращении роторов двигателей, паровых турбин, вентиляторов, гребных винтов и других подверженных этому виду движения тел. Сосредоточим мысленно массу всех вращающихся деталей механизмов судна в роторе его паровой турбины (рис. 37). Они будут двигаться вокруг продольной оси $OA$ судна с угловой скоростью $\Omega$. Предположим далее, что нос судна начал подниматься на волну, совершая поворот вокруг оси $OB$ с угловой скоростью $\omega$,

В этом случае ротор турбины будет вращаться одновременно с угловыми скоростями $\Omega$ и $\omega$.

Инерция массы ротора турбины будет оказывать сопротивление усилиям, сообщающим ему вынужденное движение. Стремясь сохранить свое вращение в прежней плоскости (см. рис. 27), ротор в силу указанной инерции обусловит отклонение судна от заданного курса $KL$ (см. рис. 37) влево. Это отклонение будет происходить до тех пор, пока соответствующей перекладкой руля не будет уравновешен гироскопический момент $M_г = I\Omega\omega$. В результате судно изменит курс на некоторый угол $\alpha$.

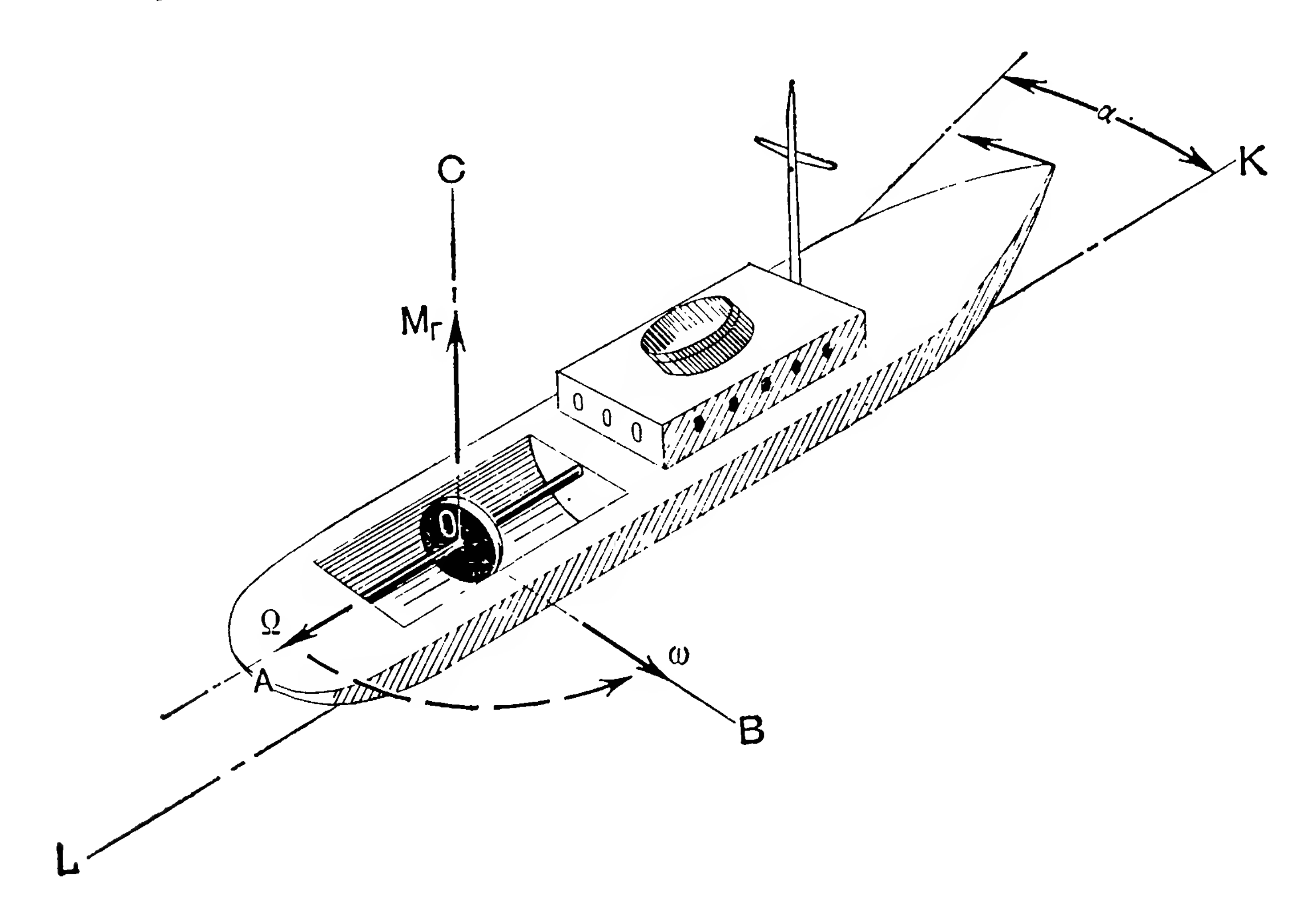



Рис. 37. Проявление гироскопического эффекта при качке судна

При обратном движении, когда носовая часть судна опускается вниз (во впадину между двумя гребнями волн) инерция массы ротора турбины вызовет отклонение судна от заданного курса $KL$ в правую сторону. При поворотах судна вокруг оси $OC$ его носовая часть в силу тех же причин в зависимости от направления маневра будет либо зарываться в воду при левом повороте, либо подниматься над ней — при правом.

Гироскопический момент обусловливает и более интенсивный износ наружного рельса закругленных участков железнодорожных и трамвайных путей. Так, при движении на криволинейном участке по окружности радиуса $R$, как показано на рис. 38, колеса вагона будут вращаться одновременно вокруг двух осей: $OA$ — собственного вращения и $OC$, параллельной оси $O_1O_1$ поворота вагона. В этом случае гироскопический момент $M_г$ зависит от осевого момента инерции $I$ каждой пары колес и от угловых скоростей $\Omega$ и $\omega$ их вращения соответственно вокруг осей $OA$ и $OC$. Момент $M_г$, действующий относительно оси $OB$ вагона, стремится совместить ось $OA$ собственного вращения

колес с осью $OC$ их вынужденного поворота, как бы приподнимая для этого колеса вагона над внутренним рельсом.

В самом деле, в результате возникшего гироскопического момента $M_г$ появятся два равных по величине, но противоположных по направлению усилия $P_1$ и $P_2$. При ширине колеи $S$ значения указанных усилий согласно формуле (4) будут равны:

$$P_1 = P_2 = \frac{M_г}{S} = \frac{I\Omega\omega}{S}.$$

Усилие $P_1$ увеличивает, а $P_2$ уменьшает давление вагона на наружный и внутренний рельсы соответственно. Вследствие на-

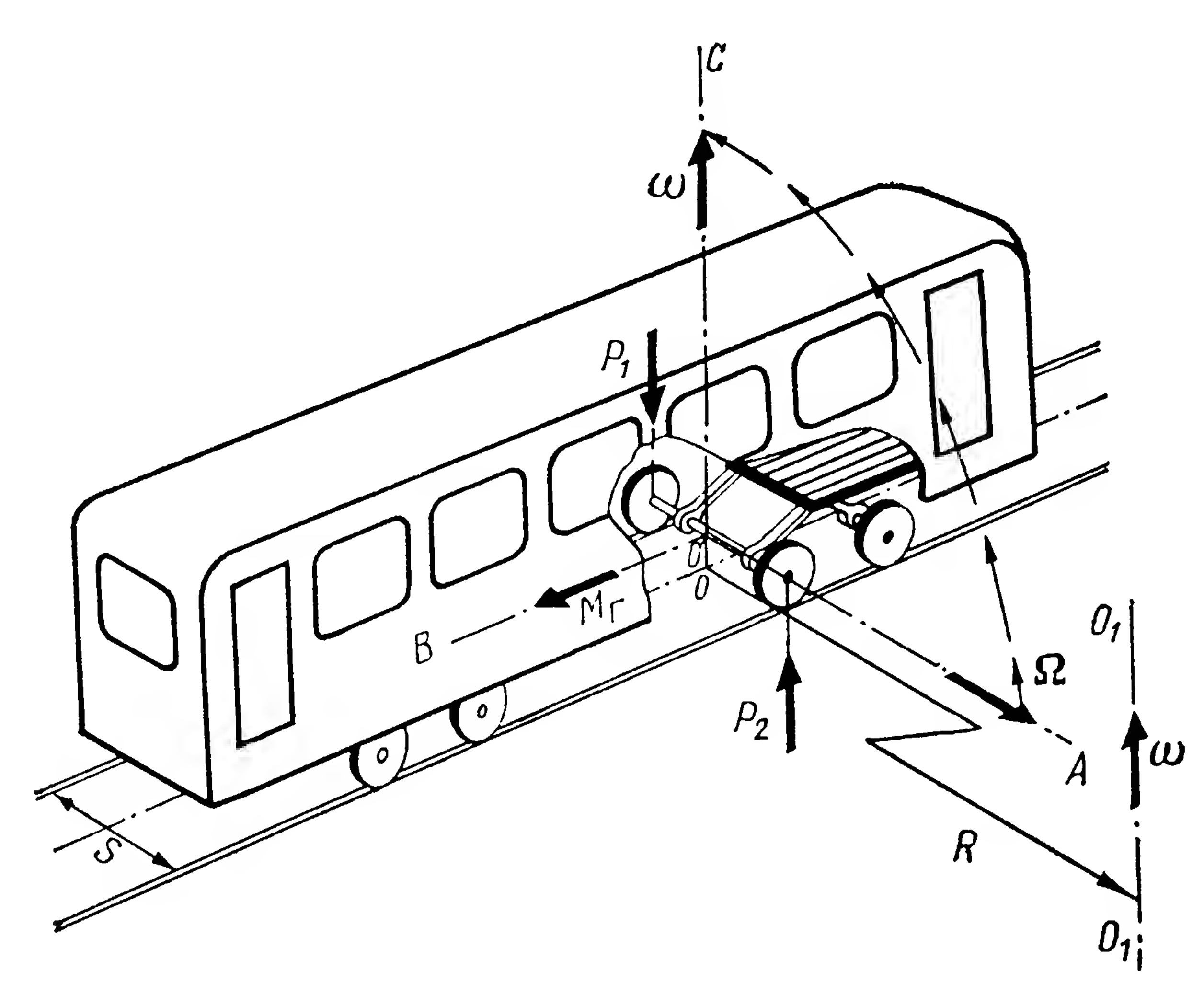


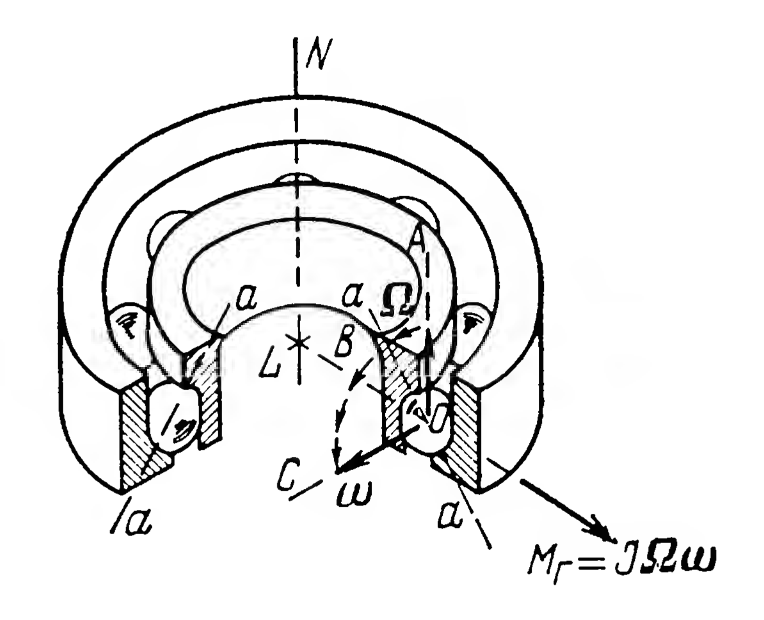

Рис 38. Возникновение гироскопической реакции при движении вагонов на криволинейных участках железнодорожного пути

личия этой избыточной нагрузки и происходит более интенсивное изнашивание наружного рельса железнодорожного пути на его криволинейных участках.

С гироскопическими явлениями приходится считаться и при работе шариковых подшипников, воспринимающих радиальные и осевые нагрузки [27]. В таких подшипниках, один из которых изображен на рис. 39, давление между его кольцами передается по линии $aa$. Последняя непрерывно изменяет свое положение в пространстве в результате вращения внутреннего кольца подшипника вокруг оси $NL$. Это вращение увлекает за собой шарики, вынужденные одновременно поворачиваться вокруг оси $OA$, параллельной $NL$, с угловой скоростью $\Omega$ и оси $OC$ со скоростью $\omega$. Последняя угловая скорость обусловливается изменением в пространстве линии $aa$, проходящей через точки контакта шарика с кольцами подшипника,

При вращении шариков вокруг осей $OA$ и $OC$, согласно равенству (4), возникает момент гироскопической реакции $M_г = I\Omega\omega$. Он стремится повернуть шарик вокруг оси $OB$, что приводит, тем самым, к увеличению сил трения, которые при высокой частоте вращения подшипников могут достигать больших

Рис. 39. Проявление гироскопического момента в шариковых подшипниках




значений, в результате чего требуются дополнительные затраты энергии для их преодоления.

Гироскопический момент принес в свое время серьезные неприятности автомобилестроителям [7]. При увеличении скорости автомобиля примерно до 70 км/ч его передние колеса начинали совершать колебания, природу которых поясняет рис. 40, *а*, одновременно вокруг вертикальных осей *BB* шкворней и вокруг го-

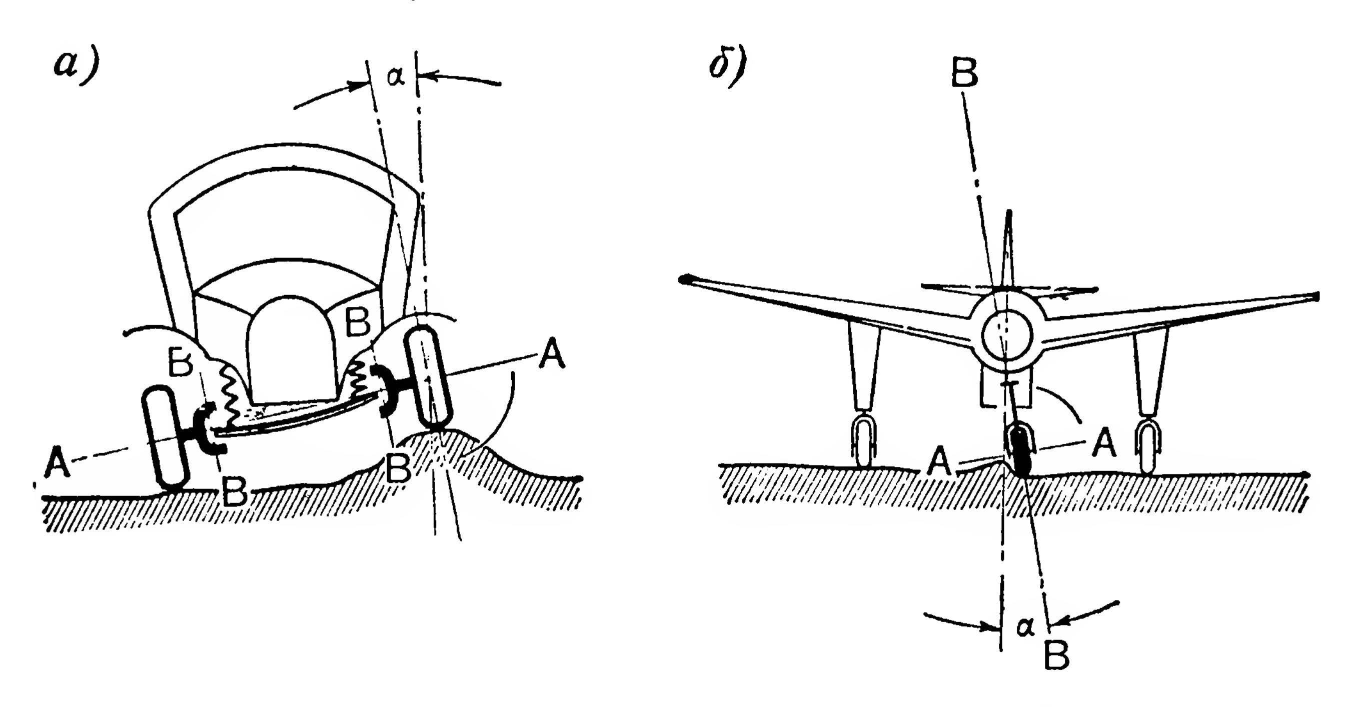



Рис. 40. К объяснению причин возникновения колебаний «шимми»: *а* — у автомобиля; *б* — у самолета

ризонтальных осей *AA*, параллельных плоскости дорожного покрытия. Эти самовозбуждающиеся колебания управляемых колес автомобиля получили название «шимми», подчеркивающее их сходство с популярным несколько десятилетий назад эксцентричным танцем. Аналогичные колебания наблюдаются и у переднего колеса трехколесного шасси самолета при движении его по посадочной полосе аэродрома [15], что иллюстрирует рис. 40, *б*.

Колебания «шимми» ухудшают управляемость машин при больших скоростях их движения. В некоторых случаях размах

указанных колебаний может достигать настолько больших значений, что это способно привести к срыву покрышки с обода колеса и к поломке деталей его крепления. Причиной таких неприятностей в данном случае будет гироскопический момент. При наезде автомобиля одним колесом на возвышающуюся неровность дороги (см. рис. 40, *а*) или при ударе переднего колеса

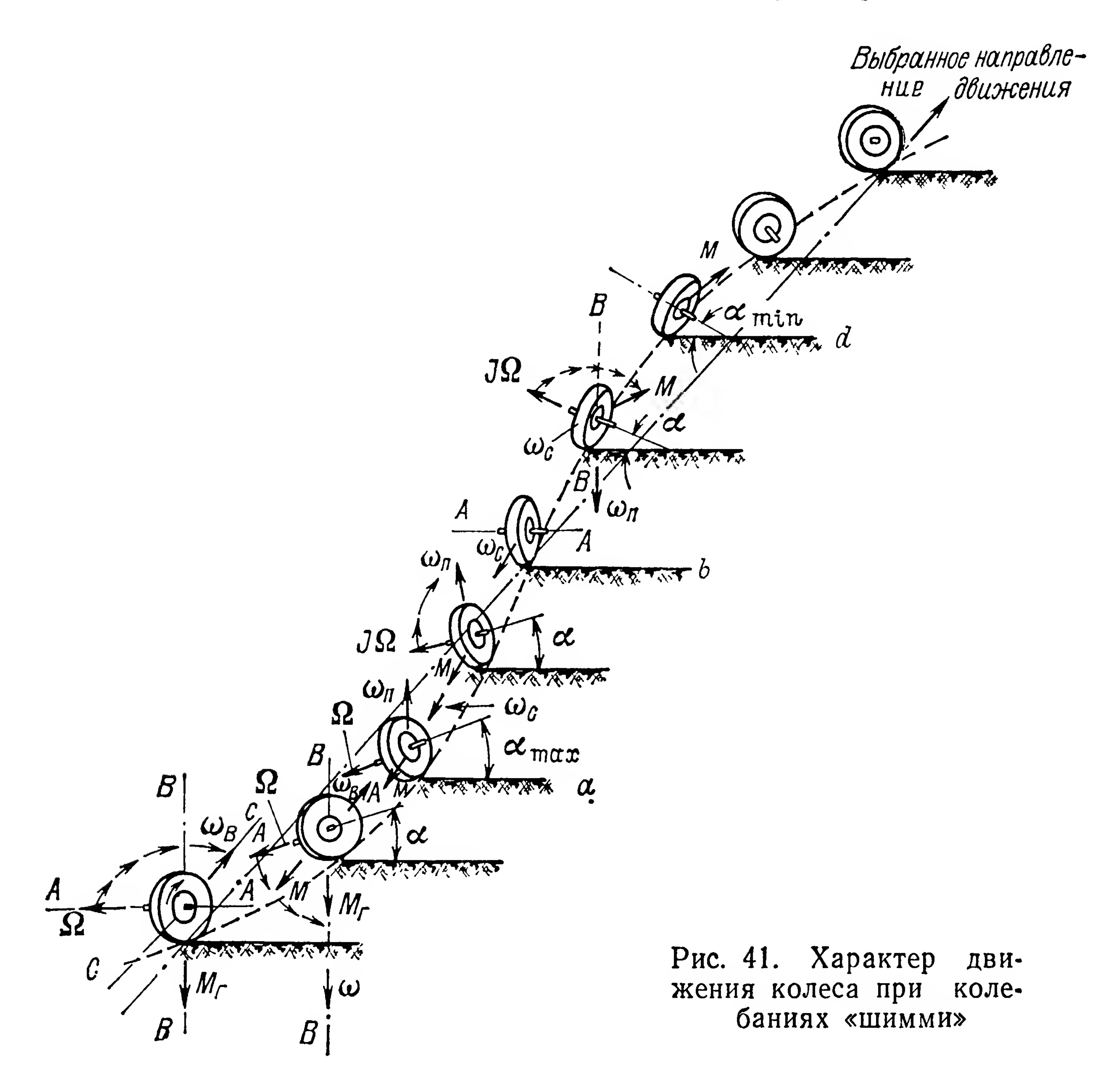



Рис. 41. Характер движения колеса при колебаниях «шимми»

шасси самолета о препятствие (см. рис. 40, *б*) происходит поворот колеса на угол $\alpha$ относительно вертикальной плоскости, совмещенной с направлением движения.

Обратимся к рис. 41. Колесу, вращающемуся вокруг оси *АА* с угловой скоростью $\Omega$, в момент наезда на препятствие сообщается дополнительная скорость $\omega_B$ вынужденного поворота вокруг оси *СС*, в связи с чем сразу же возникает гироскопический момент реакции $M_г = I\Omega\omega_B$. Вследствие этого колесо начнет поворачиваться вокруг оси *ВВ*, стремясь совместить ось *АА* своего вращения с осью *СС* вынужденного поворота. Выполнив движение вокруг оси *ВВ*, колесо начнет удаляться от выбранного направления движения. При этом оно будет все больше отклоняться от вертикальной плоскости.

Приобретая угловую скорость $\omega$ вокруг оси $BB$, колесо начнет поворачиваться и вокруг оси $CC$ с тем, чтобы совместить ось $AA$ своего вращения с направлением вектора угловой скорости $\omega$. Как только колесо начнет поворачиваться вокруг оси $CC$, деформируя упругие элементы подвески, сразу же силы упругости рессор автомобиля или стойки переднего колеса самолета создадут момент, стремящийся возвратить колесо в прежнее вертикальное положение. С возрастанием угла $\alpha$ поворота колеса относительно вертикальной плоскости увеличивается и момент $M$ упругих сил, направление действия которого в первый момент времени противоположно вектору угловой скорости $\omega_B$.

Под влиянием возрастающего момента $M$ колесо замедляет свой поворот вокруг оси $BB$ и, наконец, в положении $a$ скорость $\omega$ станет равной нулю. В этот момент угол $\alpha$ наклона колеса в вертикальной плоскости, в которой лежит направление движения, а также момент $M$ будут максимальны.

С этого мгновения на колесо, вращающееся вокруг оси $AA$ с угловой скоростью $\Omega$, будет действовать только момент $M$. Под его влиянием колесо начнет прецессировать вокруг оси $BB$ со скоростью $\omega_п$ в направлении, противоположном первоначальной скорости $\omega$, приближая колесо к линии выбранного направления движения и уменьшая тем самым величину угла $\alpha$.

Колесо начнет снова поворачиваться вокруг оси $CC$, но уже с угловой скоростью $\omega_C$, противоположной первоначальной скорости $\omega_B$ его вынужденного отклонения. Чем ближе подойдет колесо к линии выбранного направления движения, тем меньше будет восстанавливающий момент $M$, значение которого при достижении колесом положения $b$ станет равным нулю.

Ось $AA$ колеса в этот момент не будет перпендикулярна выбранному направлению движения. Поэтому колесо пересечет последнее и начнет от него удаляться теперь уже в левую сторону, все более наклоняясь к вертикальной плоскости. В результате дополнительной деформации рессор возникнет восстанавливающий момент $M$, стремящийся вернуть колесо в вертикальное положение. В результате произойдет поворот колеса вокруг оси $BB$ с угловой скоростью $\omega_п$, вектор которой направлен теперь по вертикали вниз.

Угловая скорость $\omega_C$ поворота колеса вокруг оси $CC$ начнет уменьшаться и в положении $d$ будет равна нулю. Но воздействие момента $M$ продолжается, и колесо, поворачиваясь и дальше вокруг оси $BB$, начнет вновь приближаться к линии выбранного направления движения. Далее рассмотренный характер движения колеса повторится полностью как бы в зеркальном отображении.

Вернувшись к выбранному направлению движения, колесо вновь его пересечет, и весь цикл колебаний будет полностью повторяться до тех пор, пока автомобиль или самолет не остановятся Таким образом, взаимодействие гироскопического момента реакции вращающегося колеса с возмущающими и

восстанавливающими моментами будет порождать колебания «шимми» передних колес автомобиля или самолета, если в их конструкции не предусмотрены соответствующие успокоители.

## 13. Гироскопический эффект в явлениях природы

Проявление гироскопического эффекта наблюдается и в явлениях природы. Так, например, благодаря его воздействию происходит размыв правых берегов рек северного полушария, текущих в направлении меридиана. Действительно, предположим, что на рис. 42 река $A$ течет вдоль меридиана к Северному полюсу $N$. Масса воды, сосредоточенная в некотором объеме $D$,

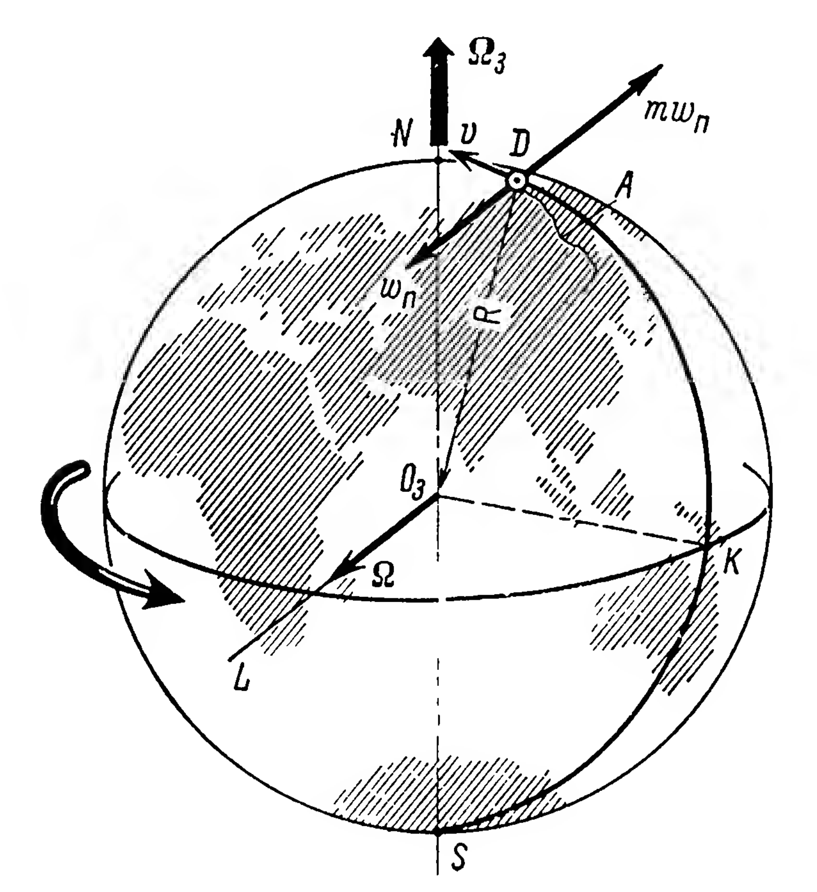


Рис. 42. К объяснению причин размывания правых берегов рек северного полушария

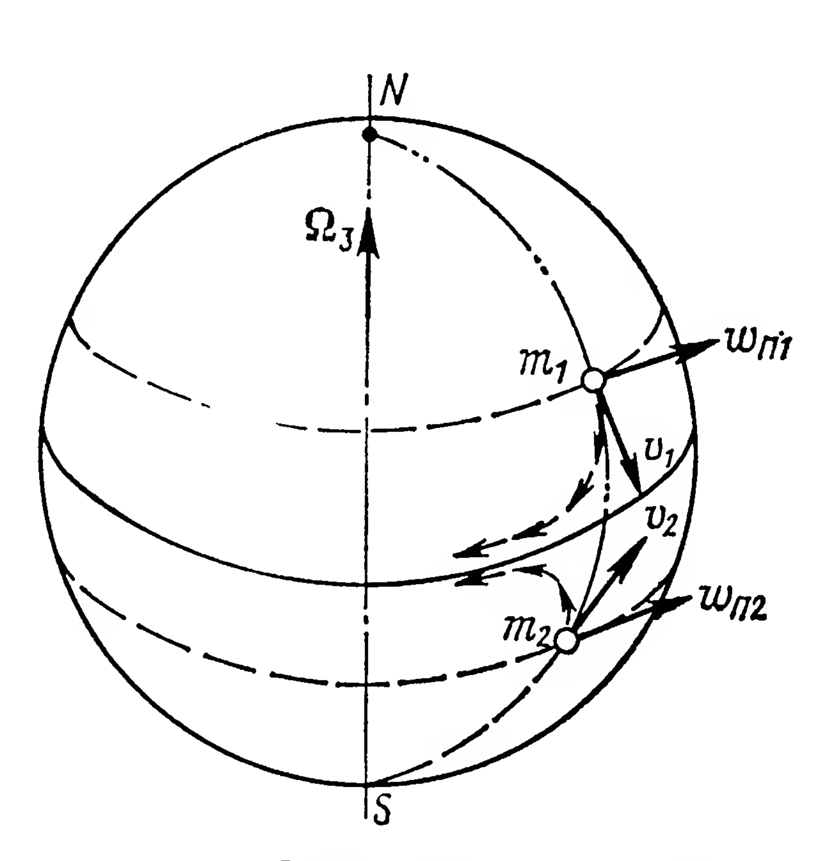


Рис. 43. Физические принципы образования пассатов

перемещается по дуге окружности радиуса $R$ вдоль меридиана $SKDN$ со скоростью $v$, совершая вращение вокруг оси $O_3L$, проходящей через центр Земли $O_3$ перпендикулярно плоскости $SKDN$, с угловой скоростью $\Omega = v/R$.

Кроме того, вода совершает вместе с земным шаром еще и суточное вращение вокруг земной оси $NS$. Таким образом, масса воды, перемещаясь по руслу реки, совершает вращение одновременно вокруг двух осей — $O_3L$ и $NS$ — и, следовательно, движется с поворотным ускорением $w_п$. Суточное вращение Земли происходит с запада на восток, поэтому вектор угловой скорости $\Omega_3$ земного вращения, совпадающий по направлению с осью $NS$, необходимо ориентировать в сторону полюса $N$.

Согласно формуле (2) поворотное ускорение $w_п = 2v\Omega_3$ направлено параллельно оси $O_3L$ перпендикулярно плоскости меридиана $SKDN$. Инерция массы воды $m$ будет оказывать сопротивление движению с поворотным ускорением $w_п$. Направленная противоположно этому ускорению сила инерции $mw_п$ дей-

ствует на правый берег реки и вызывает постепенное его разрушение.

Гироскопический эффект оказывает свое влияние и на направление ветров и морских течений. Известно, что в местностях, расположенных вблизи экватора, Солнце нагревает земную поверхность и окружающую ее воздушную оболочку значительно интенсивнее, чем в высоких широтах. Поэтому массы воздуха у экватора, обладающие более высокой температурой, поднимаются кверху, а на смену им поступают холодные потоки

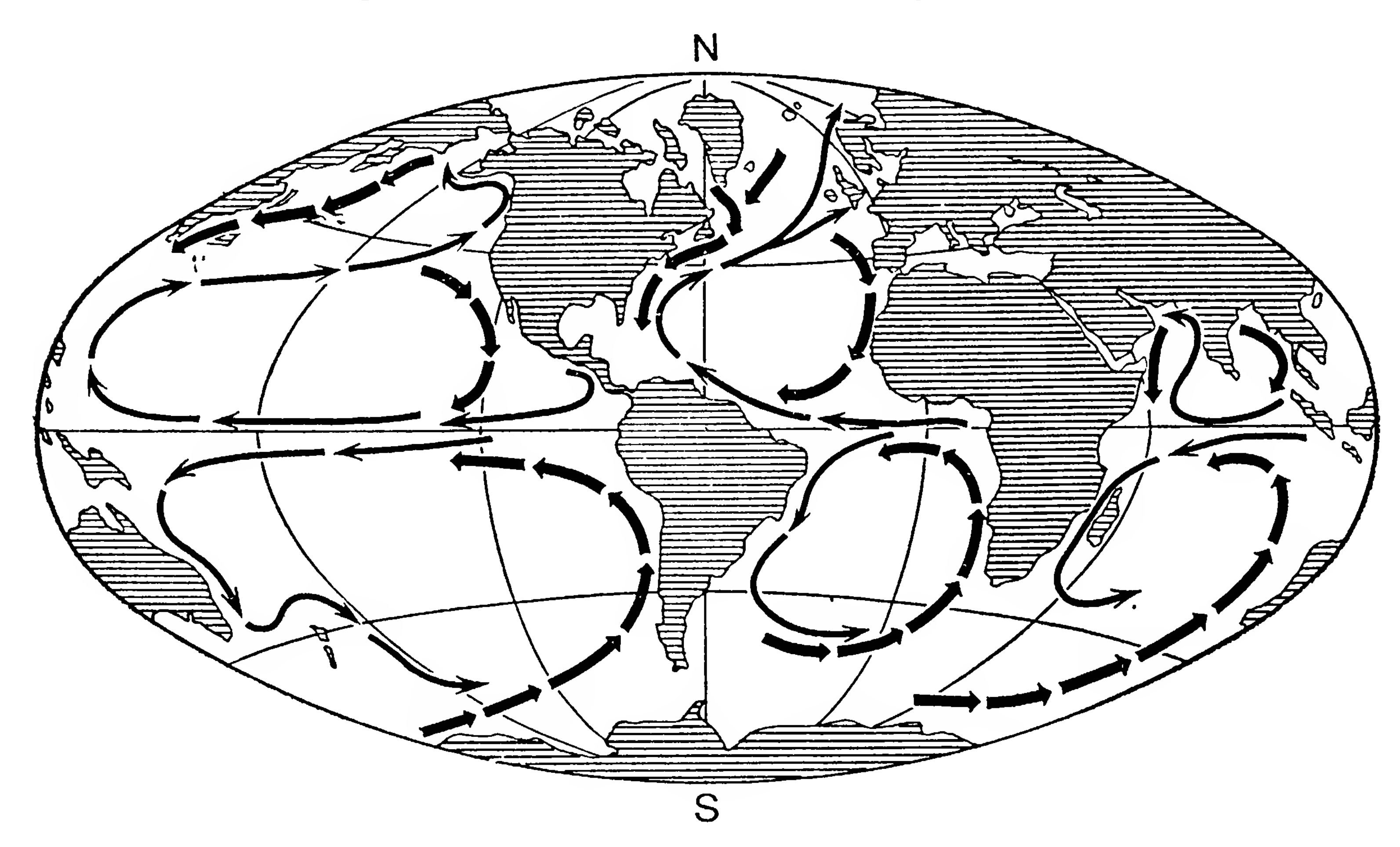



Рис. 44. Карта направлений главнейших морских течений (тонкие стрелки — теплые течения, жирные — холодные)

воздуха из высоких широт. Такое непрерывное движение воздуха у поверхности Земли порождает постоянные ветры, дующие к экватору со скоростью 6—7 м/с, однако их направление не совпадает с плоскостью меридиана.

Участвуя, как показано на рис. 43, в суточном вращении Земли вокруг оси $NS$, которое происходит со скоростью $\Omega_з$, массы воздуха $m_1$ и $m_2$, условно выделенные в виде шаровых объемов, перемещаются одновременно и относительно земной поверхности со скоростями $v_1$ и $v_2$. При этом они двигаются с поворотными ускорениями $w_{п1}$ и $w_{п2}$, направленными к востоку. Однако инерция масс воздушных потоков оказывает сопротивление сообщаемому им поворотному ускорению, в связи с чем эти массы начинают отклоняться к западу (см. рис. 21), порождая постоянно дующие ветры, названные п а с с а т а м и.

Перемещаясь вдоль экватора, пассаты увлекают за собой поверхностные воды океанов и образуют экваториальные течения, изображенные на рис. 44, которые ориентированы с востока на запад. Достигая материков Земли, они разветвляются на северные и южные, унося теплые воды тропиков в холодные районы высоких широт. Эти массы воды, вращающиеся вместе с

Землей вокруг оси $NS$, вынуждены двигаться с поворотным ускорением. Оказывая сопротивление такому вынужденному движению, массы воды, перемещающиеся от экватора к полюсам, постепенно отклоняются от меридиана. Воды, двигающиеся к Южному полюсу $S$ вначале вдоль восточных берегов материков, постепенно смещаются влево. Пересекая океаны, они достигают западных участков суши и, двигаясь далее к экватору, продолжают отклоняться влево, сливаясь снова с экваториальным течением.

Воды, перемещающиеся к Северному полюсу $N$, вследствие гироскопического эффекта отклоняются от восточных берегов материков вправо. Пересекая океаны и продолжая свое течение вдоль западных берегов Европы и Северной Америки, часть потока, движущаяся к югу, продолжает отклоняться вправо и постепенно сливается с экваториальным течением. Другая его часть, вынужденная из-за рельефа береговой линии двигаться далее на север, изменяет направление своего течения в Северном Ледовитом океане и возвращается к экватору уже вдоль восточных берегов Северной Америки и Азии.

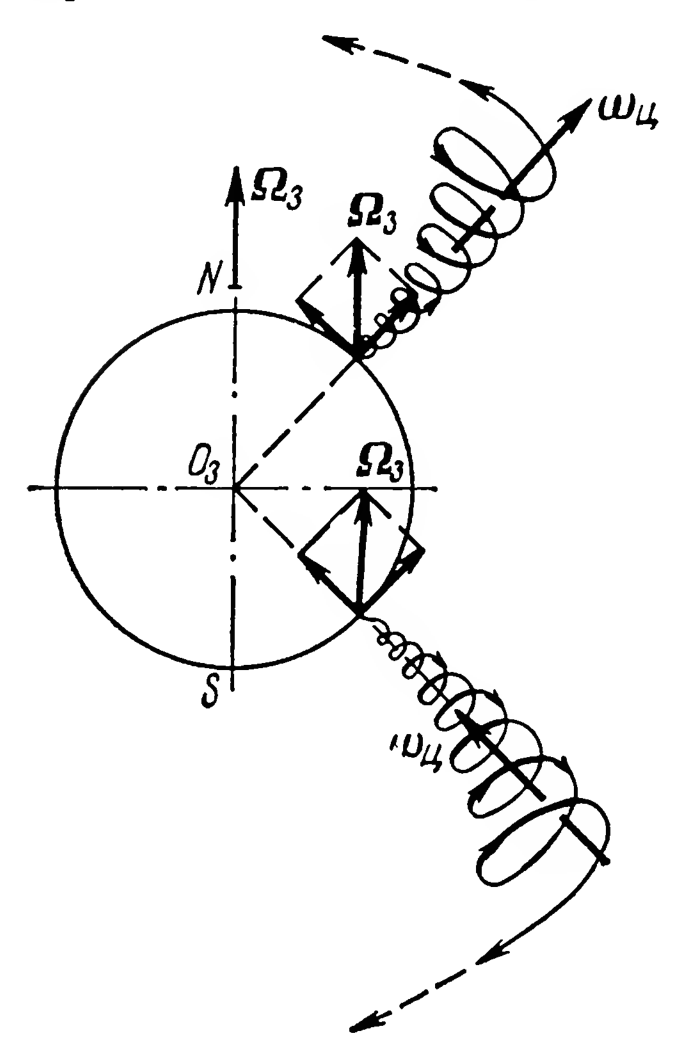



Рис. 45. К объяснению причин отклонения циклонов к географическим полюсам

Проявлением гироскопического эффекта объясняются и отклонения циклонов к географическим полюсам Земли. Вихревое движение воздуха, наблюдаемое при возникновении циклонов, происходит вокруг вертикали, причем вектор угловой скорости $\omega_ц$, как показано на рис. 45, совпадает по направлению с проекцией на эту же вертикаль вектора угловой скорости $\Omega_з$ суточного вращения Земли. Так, зарождение циклона в северном полушарии вызывает вращение воздуха вокруг оси циклона против часовой стрелки, а в южном полушарии — по часовой.

Захваченные циклоном массы воздуха, вращаясь вокруг вертикали со скоростью $\omega_ц$, участвуют одновременно и в суточном вращении Земли вокруг оси $NS$ со скоростью $\Omega_з$. В силу этого они обладают поворотным ускорением. Инерция этих масс, сопротивляясь ускорению движения, вызывает отклонение циклонов северного полушария к Северному полюсу $N$, а южного — к Южному полюсу $S$.

Гироскопичесий эффект играет существенную роль в жизни Вселенной. И огромные небесные тела и исчезающе малые электроны совершают непрерывные вращения вокруг своих осей.

Вращение является основной, необходимой формой движения всех, как писал Ф. Энгельс, «парящих в мировом пространстве тел» *. Даже Солнце совершает непрерывное величавое вращение во Вселенной.

Вращение Земли, поясняемое рис. 46, происходит со скоростью $\Omega_З$, которая равна приближенно одному обороту за 24 часа, что обеспечивает стабильное положение ее оси $NS$ в пространстве и закономерную смену дня и ночи. При годовом перемещении Земли по ее орбите вокруг Солнца на земной поверхности происходит регулярная смена времен года.

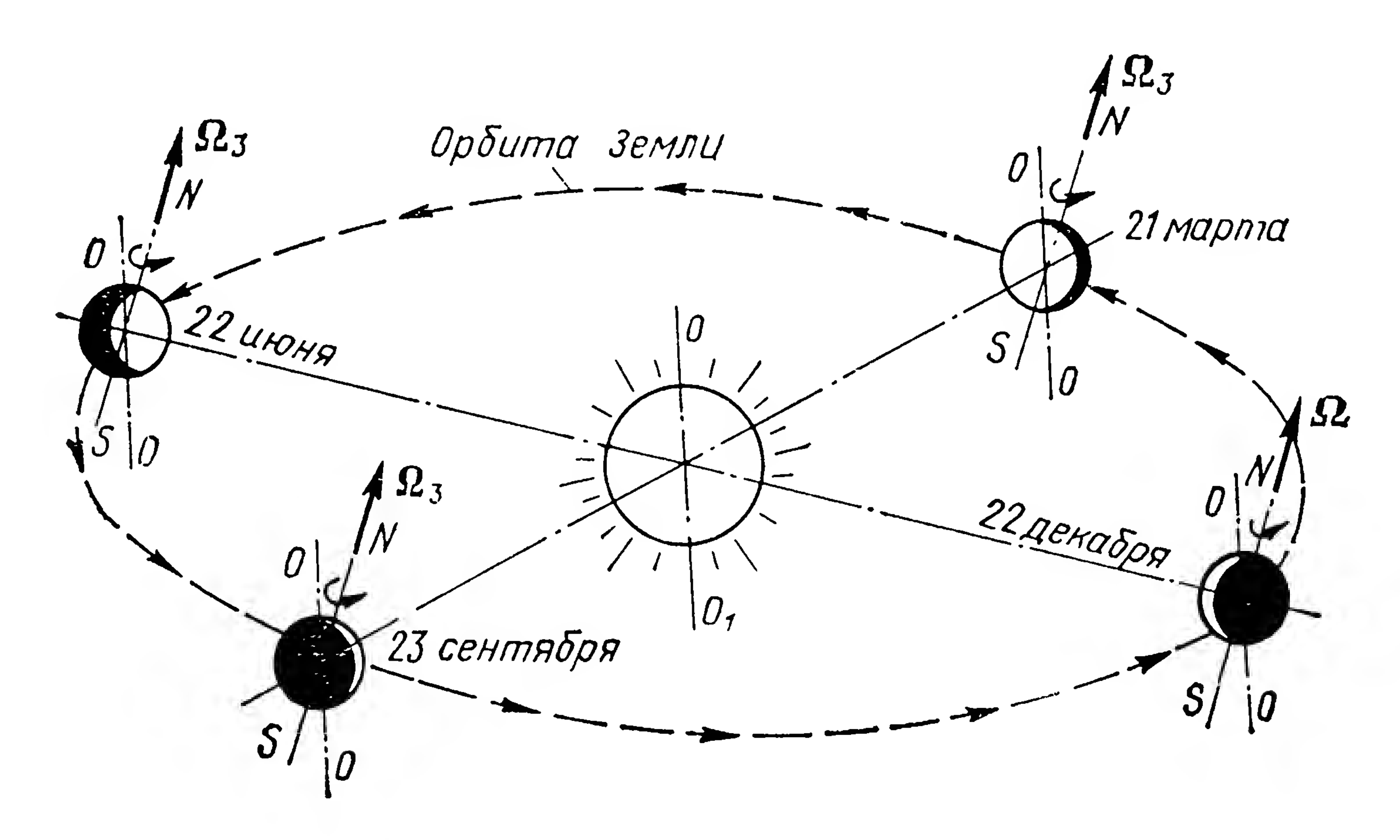



Рис. 46. Движение Земли вокруг Солнца

Вследствие стабильности ориентации оси $NS$ и благодаря ее наклону к плоскости земной орбиты Солнце в зимние месяцы освещает районы высоких широт северного полушария значительно меньше 12 часов. За Северным полярным кругом оно в этот период больше не поднимается над горизонтом, и там стоит полярная ночь. А в это время за Южным полярным кругом Солнце освещает земную поверхность круглые сутки.

Наименьшая продолжительность дня в северном полушарии 22 декабря. Затем продолжительность светлого времени дня начинает постепенно увеличиваться и 21 марта день становится равным ночи. Увеличение дня будет происходить вплоть до 22 июня. В эти месяцы Солнце круглые сутки освещает земную поверхность за Северным полярным кругом, а за Южным — стоит полярная ночь. После 22 июня день в северном полушарии начнет убывать, его продолжительность 23 сентября снова станет равной ночи и далее будет уменьшаться вплоть до 22 декабря. Указанное изменение носит циклический повторяющийся характер.

* Ф. Энгельс. Диалектика природы. М., Политиздат, 1969, с. 239.

Гироскопический эффект вращения Земли проявляется не только в смене дня и ночи, но и в смене времен года. Он играет существенную роль также и в процессе весьма медленного изменения ориентации в пространстве земной оси. Еще в 1687 году И. Ньютон доказал, что все тела, в какой бы части мирового пространства они ни находились, взаимно притягиваются друг к другу. Притяжение их тем сильнее, чем меньше расстояние

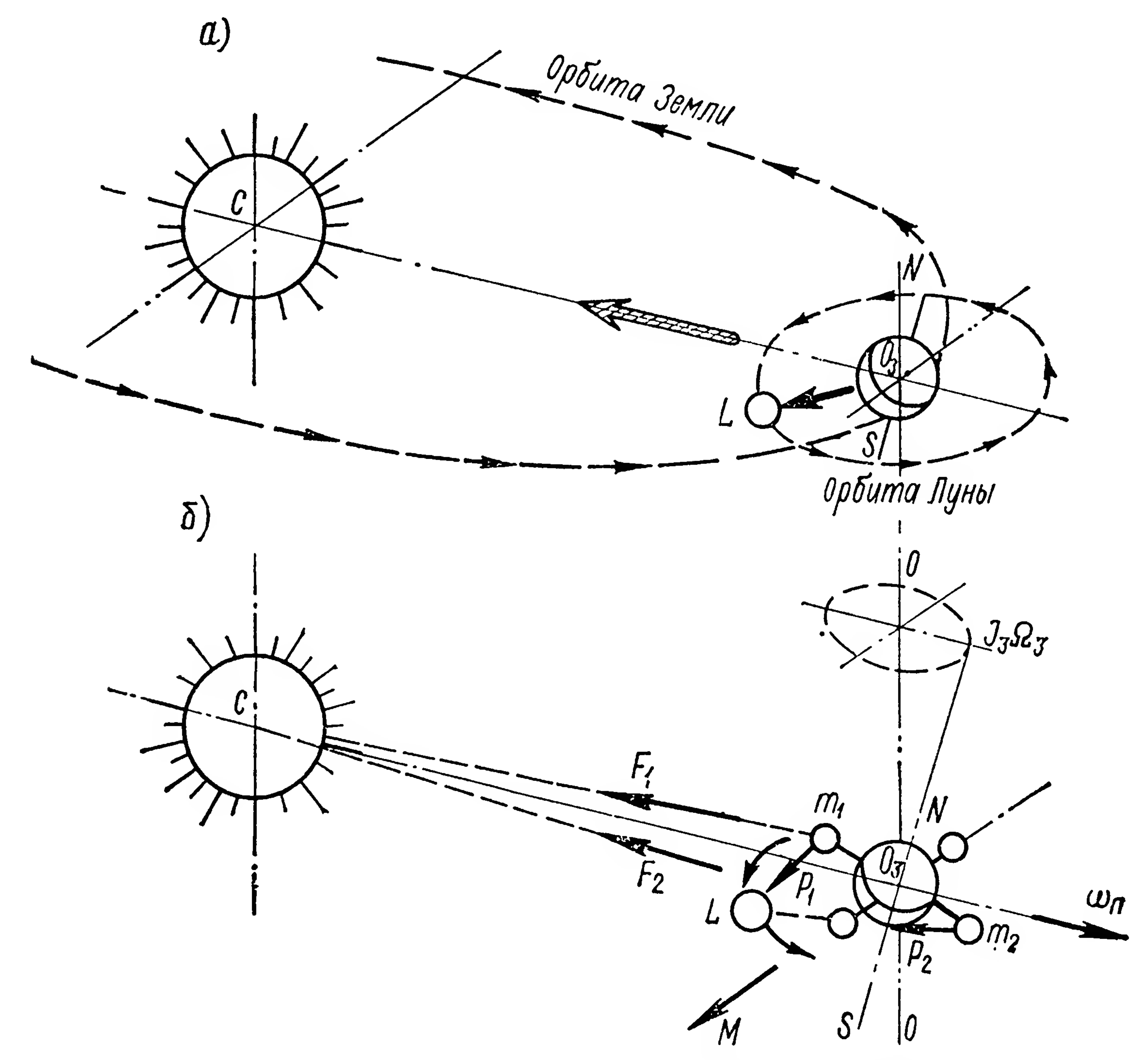



Рис. 47. Пояснение принципа прецессионного движения Земли: *а* — притяжение со стороны Луны; *б* — притяжение со стороны Солнца

между ними и чем больше их массы. Наибольшее влияние на земной шар оказывают силы притяжения масс Солнца и Луны, по сравнению с которыми силы притяжения других планет пренебрежимо малы.

Если бы Земля имела форму идеального шара с равномерно распределенной массой, то, как показано на рис. 47, *а*, равнодействующая сил притяжения как Солнца $C$, так и Луны $L$ проходила бы точно через центр Земли $O_з$ и не создавала бы относительно последнего внешних моментов. Но Земля имеет форму, лишь приближенно схожую с шаром. По ее экватору как бы расположен утолщающий пояс, постепенно уменьшающийся к географическим полюсам. Такое утолщение на экваторе можно для упрощения представить в виде четырех сконцентрированных в одинаковых шаровых объемах масс равной плотности,

которые расположены на одинаковых расстояниях от центра Земли $O_З$ на концах двух взаимно перпендикулярных диаметров, лежащих в плоскости экватора (рис. 47, *б*).

Масса $m_1$, составляющая одну четвертую часть всей массы утолщенного пояса, расположена ближе к Солнцу, чем такая же по величине масса $m_2$, которая находится на противоположной стороне плоскости экватора. Поскольку расстояние $Cm_1$ меньше $Cm_2$, то согласно закону Ньютона сила притяжения $F_1$ больше $F_2$ и их равнодействующая уже не будет проходить через центр Земли $O_З$.

Аналогичным образом на массы $m_1$ и $m_2$ будут действовать силы $P_1$ и $P_2$ притяжения Луны, так как и в этом случае расстояния $Lm_1$ и $Lm_2$ не равны друг другу. Неравенство сил $F_1$ и $F_2$ а также $P_1$ и $P_2$ вызовет появление момента $M$, действующего на земной шар относительно оси, перпендикулярной диаметру $m_1m_2$ и лежащей в плоскости экватора. Момент $M$, действуя на земной шар, вызывает его прецессионное движение, в результате которого вектор угловой скорости $\Omega_З$, а тем самым и ось $NS$ Земли будут стремиться к совмещению с вектором момента $M$. В процессе своего вращения вокруг Солнца как Земля, так и Луна непрерывно изменяют свои положения в пространстве, поэтому не остается постоянным и направление вектора момента $M$. В связи с этим земная ось $NS$ совершает вокруг оси $OO$, проходящей через центр Земли $O_З$, сложное движение с угловой скоростью $\omega_п$, равной согласно формуле (7) $\frac{M}{I_З\Omega_З}$. В процессе этого движения земная ось выступает в роли своего рода образующей конуса. Угловая скорость вследствие огромного момента инерции $I_З$ Земли относительно оси $NS$ столь мала, что время полного оборота нашей планеты вокруг оси $OO$ составляет приблизительно 26 тыс. лет.

Хотя прецессионное вращение Земли и происходит чрезвычайно медленно, оно оказывает значительное влияние на ее жизнь. Постепенный поворот земной оси $NS$ в пространстве изменяет положение отдельных областей земной поверхности относительно звезд Вселенной. Если наши древние предки, жившие шесть тысяч лет назад на широте теперешней Москвы, могли наблюдать в небе созвездие Креста, то наше поколение не видит его даже в южных районах Советского Союза. Если две тысячи лет назад Большая Медведица являлась для района Южной Греции незаходящим созвездием, то для современных греков его звезды скрыты за горизонтом.

При изменении положения оси $NS$ в пространстве не остается постоянным и наклон поверхностей отдельных областей Земли относительно направления солнечных лучей. Чем перпендикулярнее какая-либо поверхность к лучам Солнца, тем теплее в ней климат. Вот почему при прецессионном движении земного шара климат в различных его районах постепенно изменяется. В одних он становится теплее, в других — суровее.

Гироскопический эффект, обусловленный суточным вращением Земли, оказывает свое влияние и на приливные колебания уровня моря, порождаемые силами притяжения между массами Солнца, Луны и других планет с одной стороны и Земли — с другой. Взаимодействуя между собой, Солнце и Земля, а также Земля и Луна представляют системы, непрерывно вращающиеся в пространстве вокруг осей, проходящих через центры масс каждой из них. Так, Земля и Луна $L$, как показано на рис. 48, участвуют в совместном вращении вокруг оси $EE$, проходящей через центр $O$ их суммарной массы, который удален от центра Земли $O_з$ на расстояние $l$, равное 0,73 земного радиуса $R$.

В процессе этого вращения, период которого равен одному месяцу, массы $m_i$ отдельных объемов воды будут двигаться

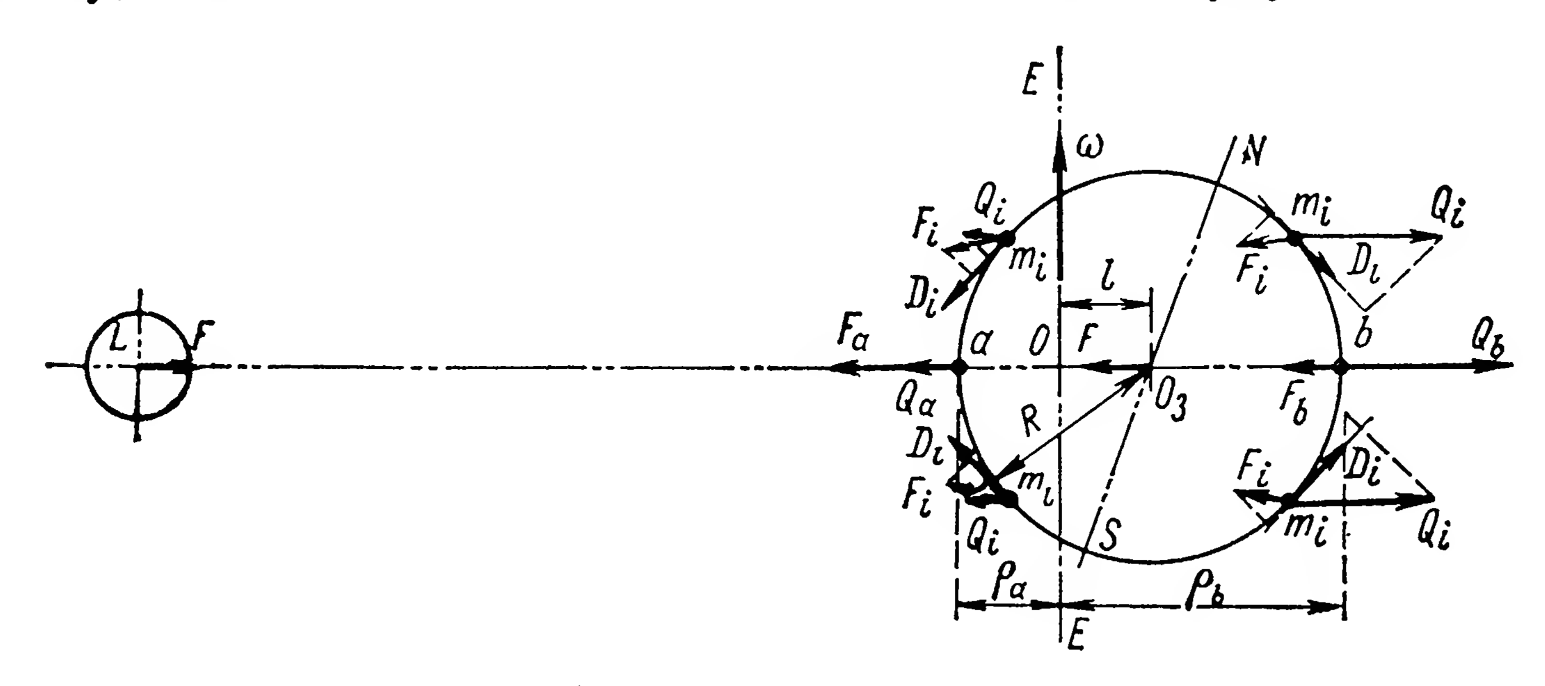



Рис. 48. Образование приливных сил

с центростремительным ускорением $w_{цi} = v_i\omega$, порождая тем самым центробежные силы инерции

$$Q_i = m_i v_i \omega = m_i \omega^2 \rho_i$$

тем большие, чем больше массы $m_i$ рассматриваемого объема воды и чем больше их удаление $\rho_i$ от оси $EE$, вокруг которой система Земля — Луна вращается с угловой скоростью $\omega$. Один и тот же объем воды в разных пунктах земной поверхности порождает различные по величине центробежные силы инерции. Так, масса $m_i$ воды, сосредоточенная в точке $a$, будет порождать центробежную силу инерции $Q_a = m_i\omega^2(R - l)$, почти в три раза меньшую силы $Q_b = m_i\omega^2(R + l)$, которая вызывается такой же массой $m_i$ воды, расположенной в точке $b$.

Сила притяжения $F_i$, действующая со стороны Луны $L$ на отдельные массы воды, будет также изменяться в зависимости от их расположения на земной поверхности. Если представить, что некоторая масса воды $m_i$ размещена в центре Земли $O_з$, то на эту массу должна будет действовать сила притяжения $F$. Если же масса $m_i$ сосредоточена в точке $a$, то сила притяжения $F_a$ будет больше ее, так как расстояние $L_a$ меньше $LO_3$. Сила же притяжения $F_b$ меньше $F$, поскольку $Lb$ больше $LO$.

Суммарные проекции $D_i$ на плоскость горизонта центростремительных сил $Q_i$ и $F_i$ притяжения Луны в любой точке Земли направлены к точкам $a$ и $b$ пересечения ее поверхности прямой $LO_з$, соединяющей центры Земли $O_з$ и Луны $L$. В результате сгона воды океанов в направлении точек $a$ и $b$ ее уровень повышается вокруг последних и понижается вдоль пояса, центральная линия которого проходит через точки $A$, $B$, $C$, $K$ (рис. 49). Если бы Земля не вращалась вокруг оси $NS$, то в точках $a$ и $b$ стояла бы полная вода максимального прилива, а в поясе $A$-$B$-$C$-$K$ — малая вода, соответствующая наибольшему отливу.

Земля за сутки делает полный оборот вокруг своей оси $NS$, поэтому меридиан любой точки на ее поверхности один раз в

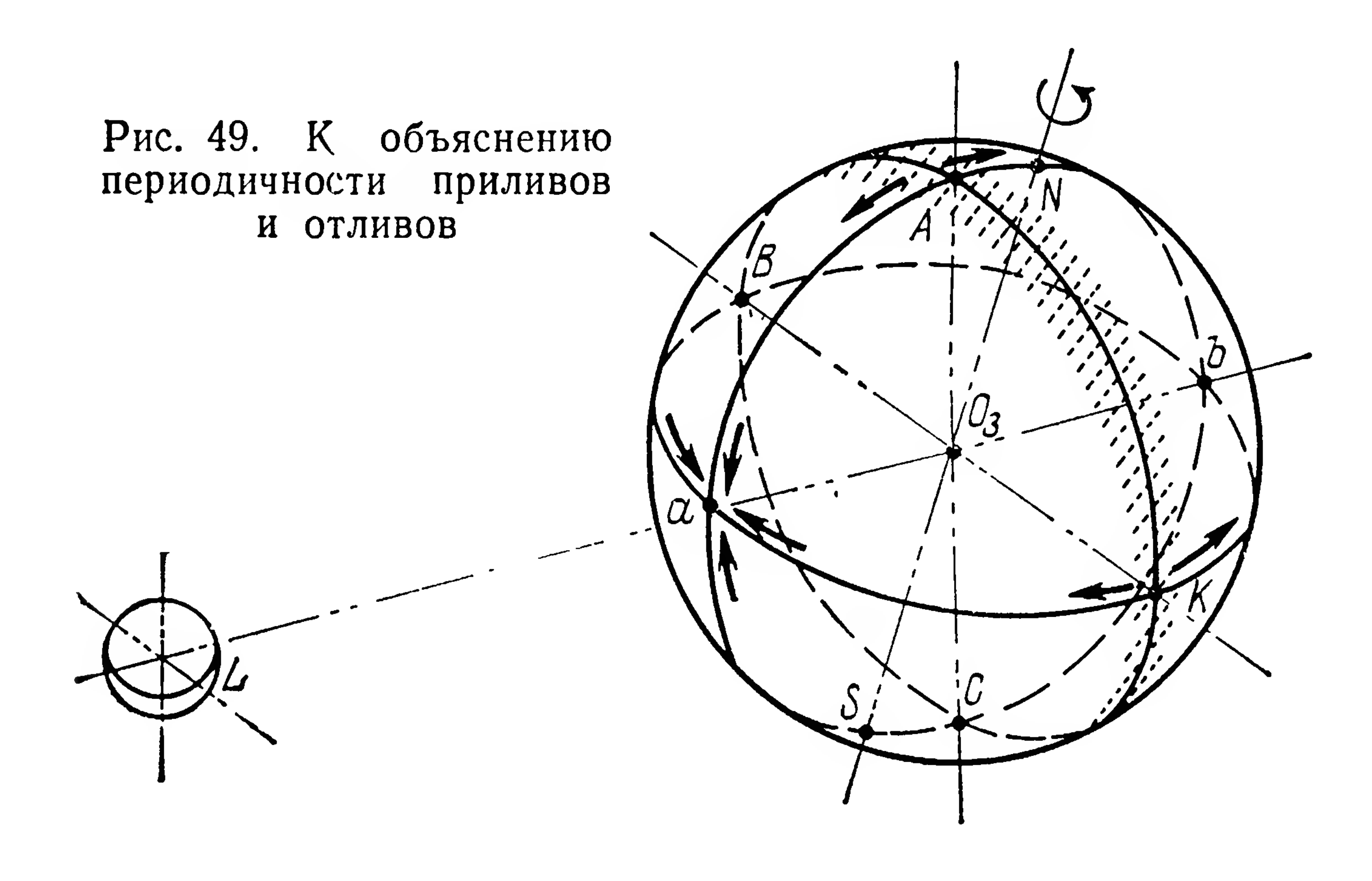



Рис. 49. К объяснению периодичности приливов и отливов

сутки будет проходить через точки $a$ и $b$ с интервалом, равным 12 ч (см. рис. 12). Вот почему море в любом районе Земли два раза в сутки достигает наибольшего уровня и соответственно снижается до минимального.

В процессе приливно-отливных перемещений воды морей и океанов их массам вследствие суточного вращения Земли приходится двигаться с поворотным ускорением. При этом массы объемов воды, двигающиеся севернее плоскости $LO_зK$, по аналогии с течениями в океанах (см. рис. 44) отклоняются вправо, а при перемещениях южнее плоскости $LO_зK$ — влево (см. рис. 49). В результате проявления гироскопического эффекта в одних прибрежных районах колебания уровня моря увеличиваются, в других — уменьшаются. Вот почему разность между малой и полной водой у побережий нередко составляет 5—6 м, а в некоторых местах даже 18 м. О том, к чему это может привести, дает представление рис. 50.

Как видим, гироскопический эффект вращающихся масс играет большую роль в жизни всего мироздания. В последние годы многие загадочные явления природы находят свое



Рис. 50. Рыбачья лодка, осевшая на камень при отливе

объяснение в проявлениях гироскопического эффекта. С ним связывают землетрясения, перемещениия оси суточного вращения Земли и многие другие события во Вселенной.

## 14. Поведение гироскопа у поверхности Земли

Суточное вращение Земли оказывает свое влияние не только на смену дня и ночи, чередование времен года, направление морских течений, но и на ряд других явлений. Даже живые организмы, обитающие на земном шаре, испытывают на себе его влияние. При этом, как показывают наблюдения, влияние гироскопического эффекта проявляется в большей или меньшей степени в зависимости от того, в каком районе нашей планеты живое существо находится. Это объясняется различием угловых скоростей вращения соответствующих плоскостей горизонта и меридиана отдельных пунктов земной поверхности, что наиболее наглядно можно изучить с использованием гироскопа.

Ранее отмечалось, что свободный гироскоп, установленный на экваторе в таком положении, когда в начальный момент вре-

мени его главная ось расположена горизонтально и направлена с запада на восток (см. рис. 17), непрерывно отклоняется от плоскости горизонта. При этом он поворачивается вокруг неподвижной относительно Земли точки своего подвеса с угловой скоростью, равной скорости суточного вращения Земли. Человек, находящийся на земной поверхности рядом с гироскопом, с первого же мгновения будет наблюдать подъем восточного конца его главной оси над плоскостью горизонта. По углу между главной осью гироскопа и плоскостью горизонта наблюдающий может судить о скорости поворота в пространстве плоскости горизонта.

Поскольку гироскоп сохраняет направление своей оси в пространстве стабильным, то уход его по отношению к земным

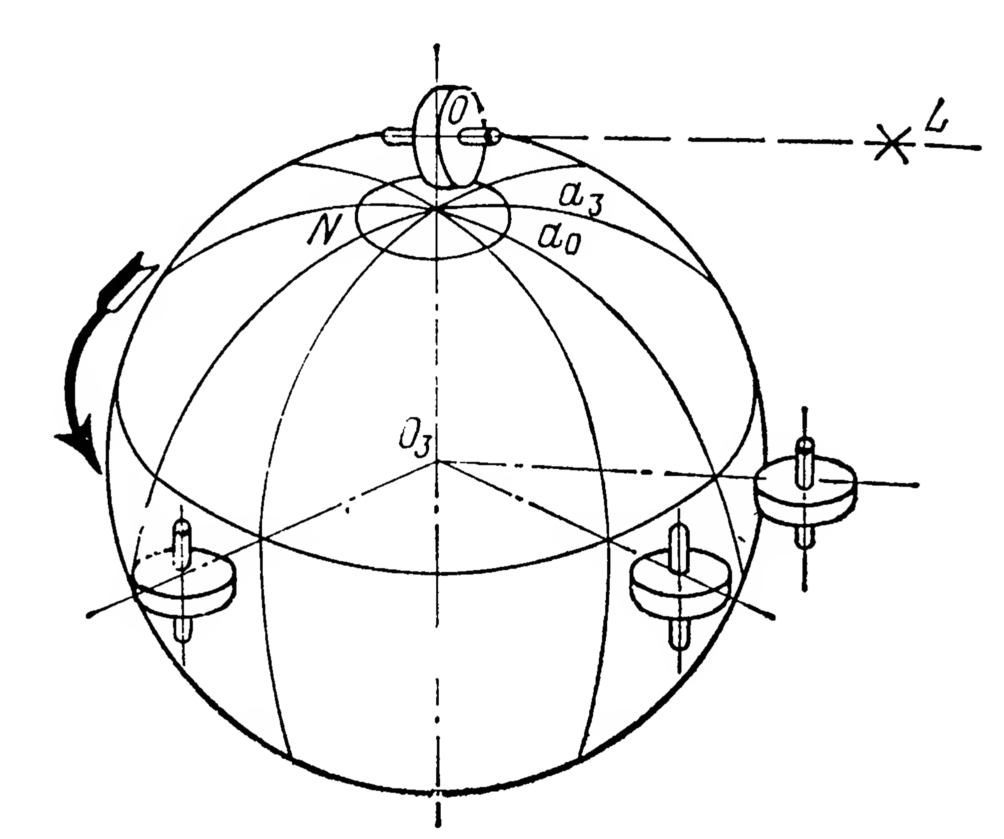



Рис. 51. Видимый уход гироскопа, установленного на полюсе

ориентирам принято называть видимым. Заметим, что последний при определенных условиях может отсутствовать. Действительно, предположим, что в начальный момент времени главная ось гироскопа, расположенного на экваторе, горизонтальна и совмещена с плоскостью меридиана, как показано на рис. 51. При этом условии гироскоп в результате вращения Земли будет переноситься вокруг ее оси $NS$ параллельно самому себе, а его главная ось останется параллельной полуденной линии, тем самым сохраняя неизменным свое положение относительно плоскостей как горизонта, так и меридиана.

Иная картина будет наблюдаться при установке гироскопа на одном из полюсов. В этих пунктах земной поверхности свободный гироскоп будет сохранять свое положение относительно плоскости горизонта неизменным, но зато будет непрерывно отклоняться от плоскости фиксированного меридиана с угловой скоростью суточного вращения Земли. Действительно, установим гироскоп на Северном полюсе так, чтобы его главная ось в начальный момент времени была параллельна плоскости горизонта и совмещалась с направлением $OL$ на неподвижную звезду $L$. Пусть проекция направления $OL$ на плоскость горизонта

начальный момент времени совпадает с направлением меридиана $Na_0$.

Исходя из суточного вращения Земли прямая $Na_0$ должна будет непрерывно отходить от первоначального направления $OL$, совершая поворот вокруг земной оси $NS$ с угловой скоростью суточного вращения. В результате прямая $Na_0$ по прошествии трех часов займет положение $Na_3$. А в это время главная ось гироскопа будет по-прежнему совмещена с направлением $OL$. С течением времени линия $Na_0$ будет все более и более отклоняться к востоку от направления $OL$ и по истечении 24 ч вновь займет исходное положение.

Сопоставив между собой случаи видимого ухода свободного гироскопа, замечаем, что угловая скорость отклонения его глав-

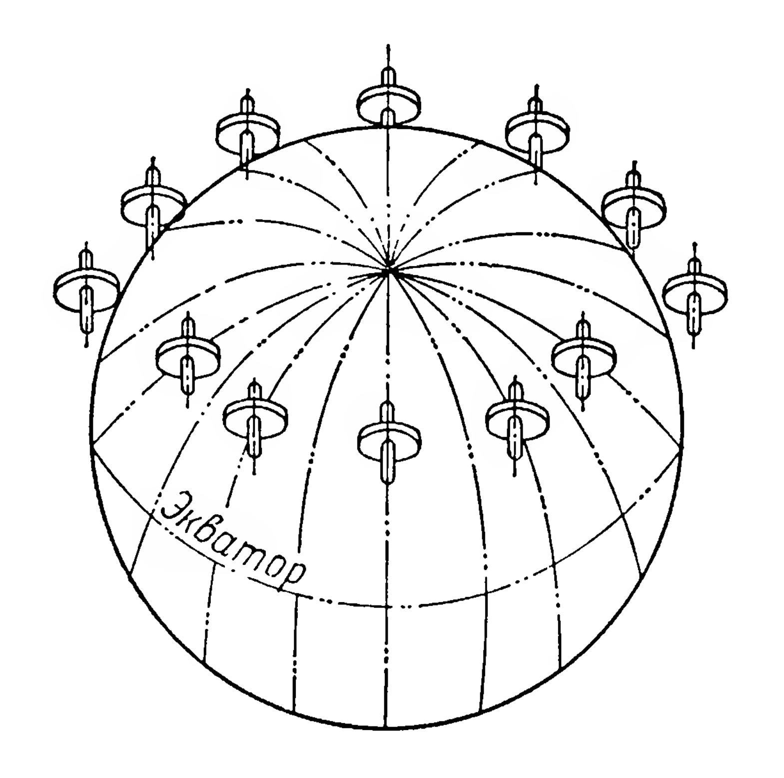



Рис. 52. Видимый уход гироскопа при установке его в каком-либо пункте между полюсом и экватором

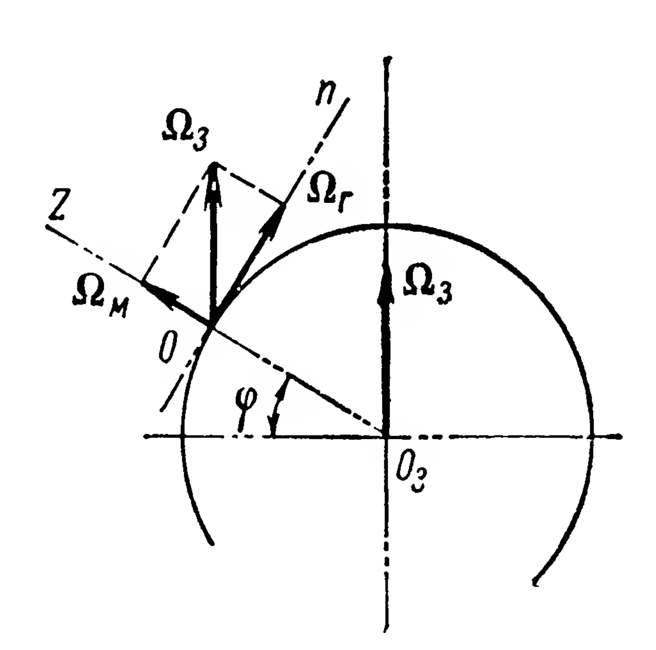



Рис. 53. Угловые скорости вращения в пространстве плоскостей горизонта и меридиана

ной оси от плоскости горизонта достигает максимума, равного угловой скорости суточного вращения Земли, на экваторе и становится равной нулю на полюсах. Уход же от плоскости меридиана равен нулю на экваторе и достигает максимума на полюсах. Во всех других случаях, когда свободный гироскоп установлен на земной поверхности на промежуточных географических широтах, как показано на рис. 52, его видимый уход будет иметь место относительно как горизонта, так и меридиана, которые в общем случае непрерывно вращаются в пространстве.

Угловые скорости вращения зависят от географической широты $\varphi$ точки $O$ земного шара и определяются проекциями $\Omega_г$ и $\Omega_м$ вектора угловой скорости $\Omega_з$ суточного вращения Земли соответственно на полуденную линию $On$ и вертикаль $OZ$. Сказанное иллюстрирует рис. 53. С угловой скоростью $\Omega_г$ совершает вращение в пространстве вокруг полуденной линии $On$ плоскость горизонта, а со скоростью $\Omega_м$ плоскость меридиана вращается вокруг вертикали данного места.

Изложенные законы видимого ухода свободного гироскопа относительно плоскостей горизонта и меридиана могут быть наглядно продемонстрированы с помощью специальных установок. Одна из них, изображенная на рис. 54, состоит из глобуса большого диаметра $NS$, на поверхности которого установлен гироскоп $Г$ с тремя степенями свободы. Точка его подвеса может перемещаться вдоль меридиана глобуса от экватора до полюса. При этом главной оси можно придавать любые положения по отношению к поверхности глобуса.

Пользуясь описанным стендом, представляется возможным изучать законы поведения гироскопа у земной поверхности весьма наглядным способом. Ось гироскопа свое положение в пространстве сохраняет стабильным, поэтому при вращении глобуса вокруг вертикальной оси гироскоп будет изменять свое положение по отношению к его поверхности. При вращении глобуса следует наблюдать за последовательными изменениями положения главной оси гироскопа относительно поверхности глобуса, пример которых показан на рис. 55.

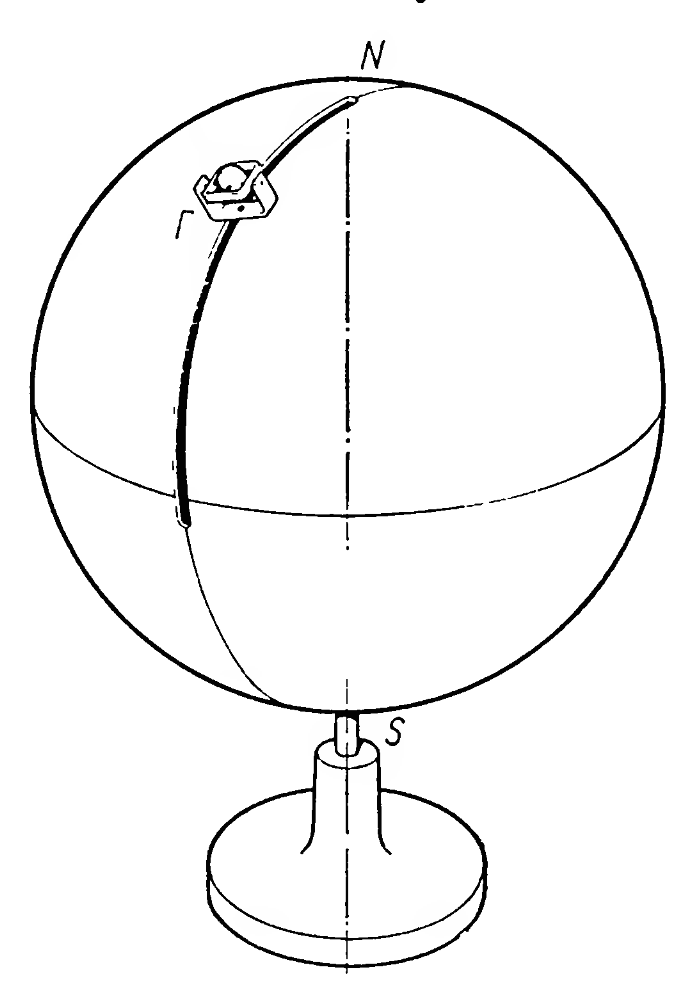


Рис. 54. Глобус с гироскопом


Рис. 55. Изучение на стенде поведения гироскопа на земной поверхости

По результатам таких наблюдений и составляют суждение об угловых скоростях видимого ухода свободного гироскопа относительно плоскостей горизонта и меридиана выбранного пункта на земной поверхности. В приборе имеется также устройство для уменьшения степеней свободы гироскопа на одну. Тогда на стенде можно исследовать поведение двухстепенного гироскопа при вращении корпуса последнего вокруг той или иной оси его подвеса (см. рис. 29).

Описанный стенд получил широкое распространение в училищах штурманов морского и воздушного флотов. Он позволяет наглядно изучать сложные изменения ориентации главной оси гироскопа, сохраняющей неизменным свое положение в пространстве по отношению к палубе корабля, двигающегося в произвольной точке земной поверхности при любых значениях курса и скорости. При этом последний стенд позволяет производить раздельное изучение влияния на угловую скорость отклонения гироскопа от заданного направления как суточного вращения Земли, так и параметров движения корабля по земной поверхности.

## 15. Появление гироскопического эффекта в живых организмах

Широко известно, что человек, двигающийся по земной поверхности при отсутствии видимости до каких-либо ориентиров,

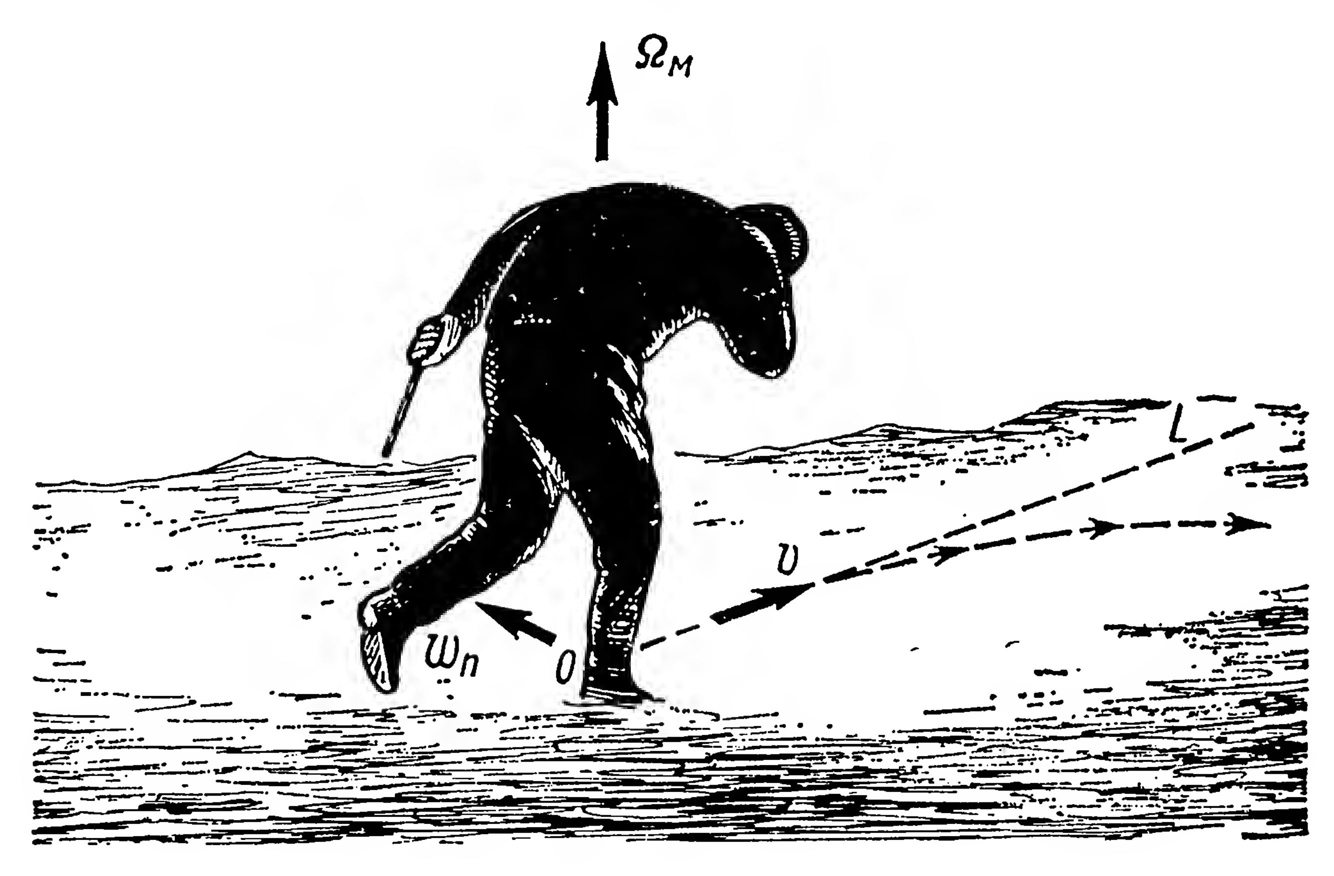



Рис. 56. Проявление гироскопического эффекта при движении человека по земной поверхности

как это бывает, например, при пурге (рис. 56), в тумане, в беззвездную ночь и при других аналогичных обстоятельствах, начинает постепенно отклоняться от выбранного направления. Незаметно для себя пешеход двигается по окружности и по прошествии некоторого времени возвращается, к своему удивлению, в исходный пункт. Установлено, что такое блуждание пут-

ников по кругу совершается в северном полушарии всегда вправо, а в южном — влево.

Описанное явление объясняется тем, что человек, двигающийся со скоростью $v$ в направлении $OL$, совершает одновременно еще и вращение вместе с плоскостью горизонта вокруг вертикали с угловой скоростью $\Omega_м$ (см. рис. 53). Тем самым идущий человек вынужден двигаться с поворотным ускорением, вектор $\omega_п$ которого в северном полушарии направлен влево от направления движения $OL$.

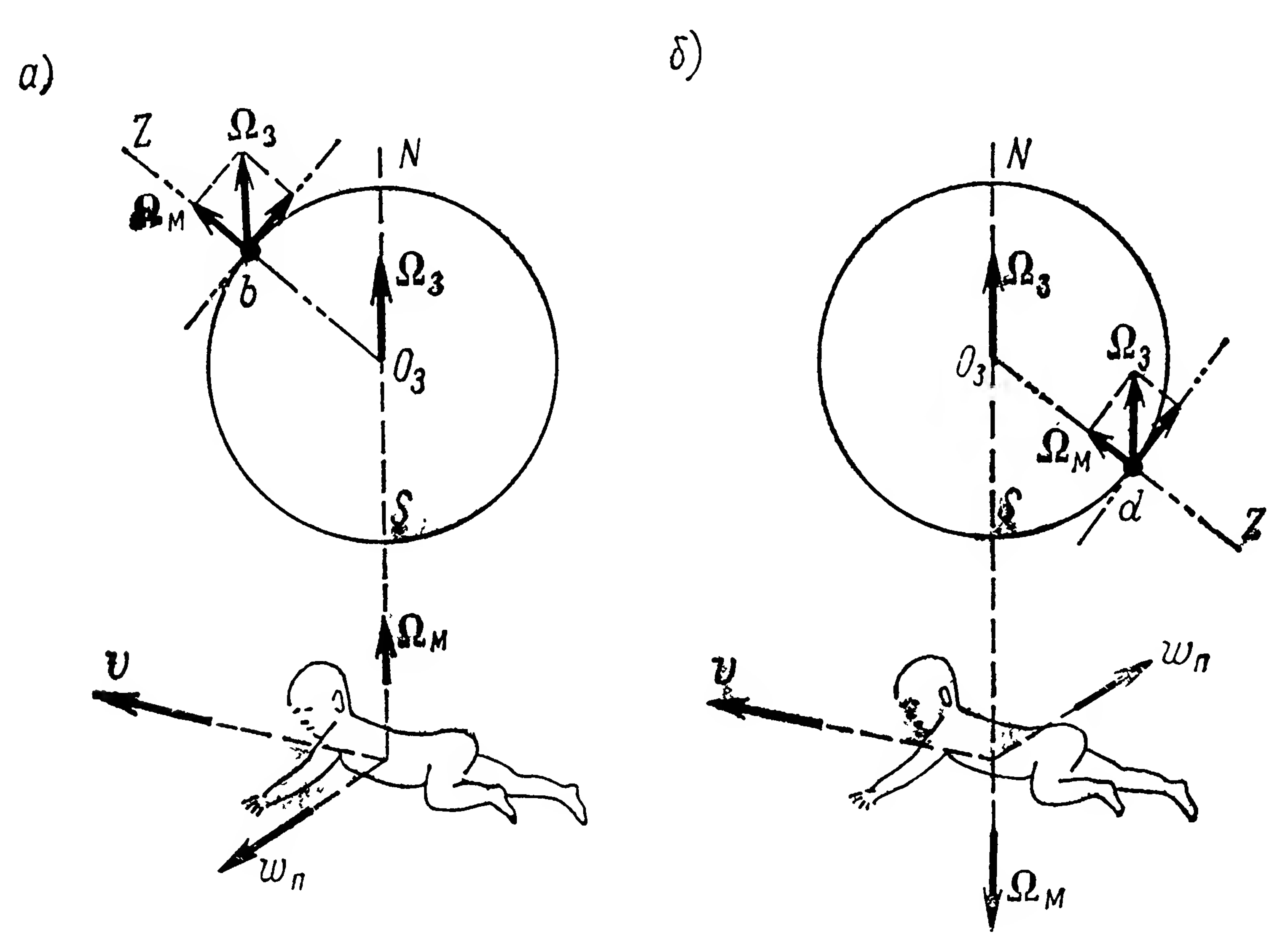



Рис. 57. Влияние гироскопического эффекта на появление правшей и левшей

Масса человека оказывает сопротивление силам, порождающим движение с поворотным ускорением. Возникающий при этом момент гироскопической реакции человека будет способствовать сохранению пешеходом прямолинейного движения в пространстве. Вот почему человек, как и любая движущаяся элементарная масса (см. рис. 20), начнет постепенно отклоняться от выбранного на земной поверхности направления движения $OL$ (см. рис. 56), непрерывно вращающегося в пространстве вместе с плоскостью меридиана.

Гироскопический эффект, обусловленный суточным вращением Земли, оказывает влияние на количество появлений в различных странах нашей планеты людей с более развитой левой рукой. Число таких людей, как показывает статистика [21, 37], в южном полушарии значительно больше, чем в северном. Объясняется это тем, что ребенок, только что начинающий ползать, уже испытывает на себе влияние поворотного ускорения. В самом деле, представим себе, что малыш, изображенный на

рис. 57, ползет по земле с некоторой скоростью $v$. Естественно, что в это же время он участвует и в суточном вращении Земли, поворачиваясь вокруг вертикали $O_з Z$ в данном месте с угловой скоростью $\Omega_м$.

Для малыша, находящегося в северном полушарии, например в точке $b$ (рис. 57, *а*), это вращение вокруг вертикали $O_з Z$ происходит против часовой стрелки, так как скорость $\Omega_з$ суточного вращения Земли дает в направлении вертикали $O_з Z$ составляющую $\Omega_м$, вектор которой направлен вверх в сторону зенита $Z$. Если же ребенок находится в южном полушарии, например в точке $d$ (рис. 57, *б*), то его вращение вокруг вертикали $O_з Z$ происходит уже в противоположном направлении.

В силу этих обстоятельств ребенок, перемещающийся по земной поверхности в северном полушарии, вынужден двигаться с поворотным ускорением $w_п$, направленным в левую сторону относительно выбранного направления движения. Ускорение $w_п$ воспринимается малышом как проявление силы, стремящейся повалить его на правый бок. Противодействуя ей, ребенок начинает опираться о землю правой рукой. В южном же полушарии (рис. 57, *б*) он, ползая, заваливается на левый бок и ему для сохранения равновесия приходится опираться о поверхность уже левой рукой. Вот почему в первые годы жизни малыши северного полушария больше работают правой рукой, а дети южного полушария — левой.

На преимущественное развитие у человека правой или левой руки влияет и ряд других факторов [51]. Наследственность, установившиеся традиции, уклад жизни, выработанные веками приемы обращения с воинским оружием, орудиями труда и музыкальными инструментами — все это оказывает свое влияние на более интенсивное развитие правой или левой руки человека. Однако среди перечисленных причин гироскопический эффект, обусловленный суточным вращением Земли, имеет далеко немаловажное значение.

Несмотря на то, что выработанные приемы и применяемые орудия труда повсеместно заставляют человека работать больше правой рукой, количество левшей в южном полушарии весьма значительно. Если число людей с более развитой левой рукой в странах северного полушария не превышает 2—6 % общего количества населения, то в странах южного полушария, таких как, например, Австралия, количество левшей достигает 26 %, а для Южной Африки эта цифра еще больше [37].

Человеческий организм обладает высокой чувствительностью к прикладываемым к нему ускорениям благодаря тому, что наше ухо, схематически изображенное на рис. 58, предназначено не только для восприятия звуков, но и для управления положением тела в пространстве. Звук, поступающий в слуховой проход *1* наружного уха, вызывает колебания барабанной перепонки *2*, которая герметически отделяет среднее ухо от внешней среды. Эти колебания посредством слуховых косточек *3* пере-

даются барабанной полости и улитке *5*, расположенной уже во внутреннем ухе. В результате изменяется давление воздуха, находящегося в барабанной полости, и жидкости в улитке. Изменения жидкостного давления в улитке и передаются слуховыми нервами *6* в мозг.

Во внутреннем ухе находится и так называемый в е с т и б у л я р н ы й   а п п а р а т, состоящий из трех полукружных каналов *4*, которые расположены в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Каждый канал соединен с общим резервуаром, называемым преддверием. Внутренние полости преддверия и полукружных каналов заполнены жидкостью — эндолимфой, в которую погружены окончания чувствительных волокон вестибулярной части слухового нерва *6*.

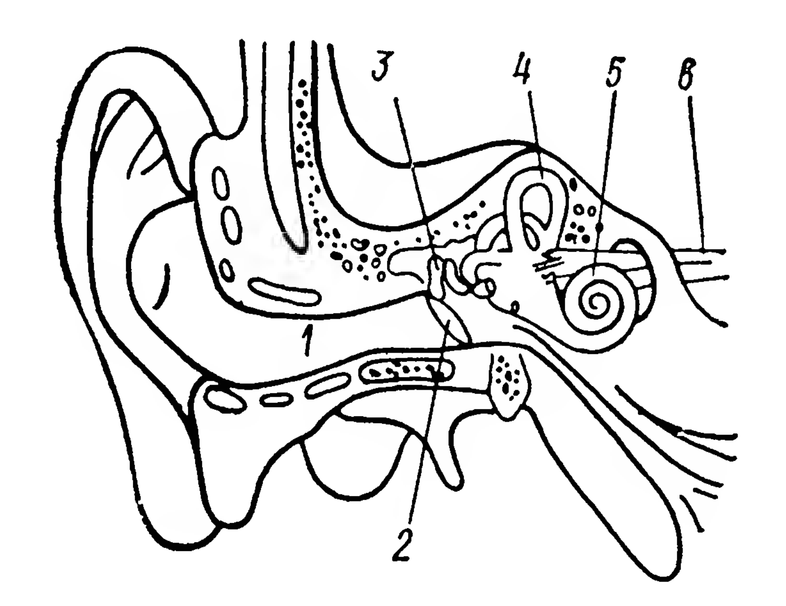



Рис. 58. Строение уха человека

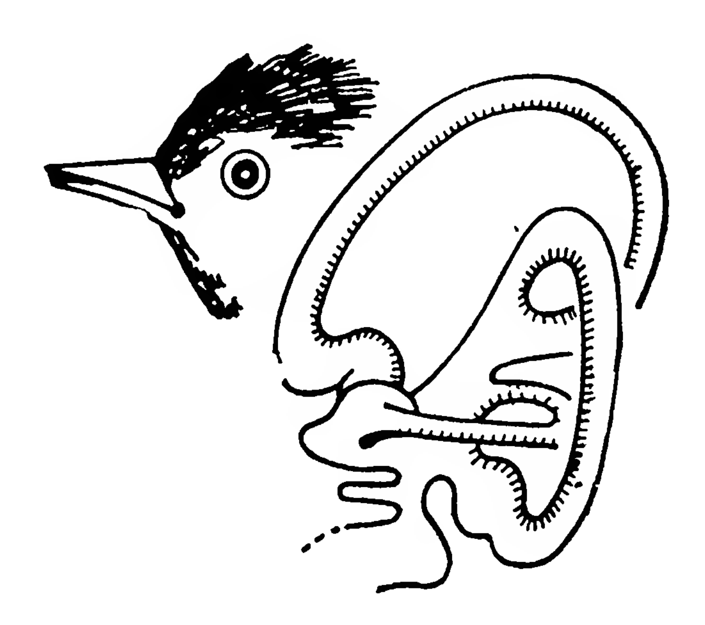


Рис. 59. Вестибулярный аппарат птиц

При испытываемых человеком ускорениях эндолимфа соответствующего полукружного канала *4* начинает перемещаться в направлении, противоположном этому ускорению, вызывая деформацию окончаний вестибулярной части слухового нерва. Его раздражение передается в мозг человека и воспринимается им как сигнал о сообщении телу ускорения в том или ином направлении.

Высокая чувствительность вестибулярного аппарата вызывает у некоторых даже совершенно здоровых людей появление болезненного состояния при морской качке, колебаниях самолета и вибрации автомобиля [52]. Вот почему при отборе лиц для работы в морском флоте, авиации и в области космических полетов проверяют реакцию каждого испытуемого на переносимые им ускорения.

Вестибулярным аппаратом обладают многие живые организмы. Даже у простейших из них существуют органы равновесия [35]. Весьма высока чувствительность последних у птиц, которые пользуются этими органами для ориентировки при перелетах [11, 35]. При любых отклонениях направления полета от плоскости меридиана в каждом из полукружных каналов вестибулярного аппарата птицы, показанного на рис. 59, возникают изменения давления эндолимфы.

При горизонтальном полете в плоскости меридиана $NOZ$, основные факторы которого показаны на рис. 60, в направлении как на север $N$, так и на юг $S$ птица вследствие вращения указанной плоскости вокруг вертикали $OZ$ с угловой скоростью $\Omega_м$ вынуждена преодолевать поворотное ускорение $w_{п.\,м}$. Вектор последнего, как отмечалось ранее, горизонтален и направлен в северном полушарии влево по ходу полета. Поэтому в горизонтальном полукружном канале вестибулярного аппарата птицы возникает давление $F_м$, направленное вправо. Если же полет

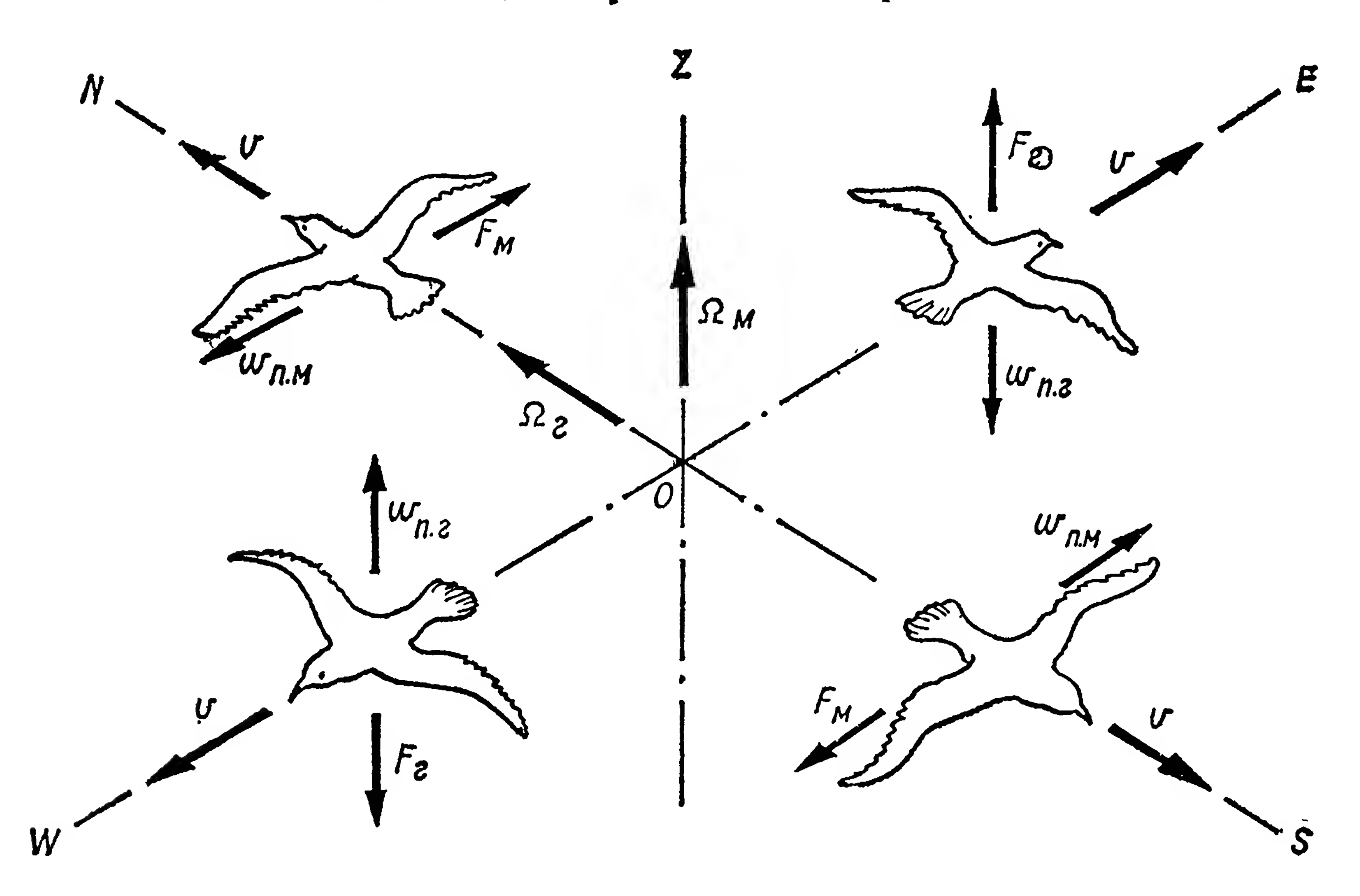



Рис. 60. К объяснению использования птицами гироскопического эффекта для ориентирования

происходит в направлении запад $W$ — восток $E$, то птице приходится преодолевать дополнительно еще и поворотное ускорение $w_{п.\,г}$, порождаемое вращением плоскости горизонта $NOW$ вокруг полуденной линии $NS$ с угловой скоростью $\Omega_г$ (см. рис. 53).

При полете на запад вектор поворотного ускорения $w_{п.\,г}$ направлен вертикально вверх, а при движении на восток — вниз. Поэтому в вертикальных полукружных каналах возникает дополнительное давление $F_г$, направленное в первом случае вниз, а во втором — вверх. По величине и направлению последнего птица и ориентируется относительно частей света. Увеличение давления $F_г$, направленного вертикально вверх, сигнализирует об отклонении полета от плоскости меридиана к востоку $E$ при движении на север $N$ и отклонении к западу $W$ — при полете на юг $S$. В свою очередь, изменение давления $F_г$, направленного вертикально вниз, сигнализирует об отклонении движения к западу $W$ при полете на север $N$ и к востоку $E$ — при движении

на юг $S$. Чем больше значение $F_г$, тем больше угол между направлением полета и плоскостью меридиана $NOZ$.

Проявление гироскопического эффекта наблюдается и у двукрылых насекомых, пример которого дан на рис. 61. Они обладают жужжальцами $a$. Вибрируя во время полета в плоскости $yOz$, такие утолщенные кончики жужжальцев производят возвратно-поступательные движения по окружности радиуса $R$ с реверсируемой скоростью $\pm v$.

Если насекомое, поворачиваясь вокруг оси $Oy$ или $Oz$, начнет отклоняться от выбранного направления полета $OL$, то такой маневр сразу же повлияет на характер движения жужжалец. Так, при вращении насекомого вокруг оси $Oy$ или $Oz$ с угловой

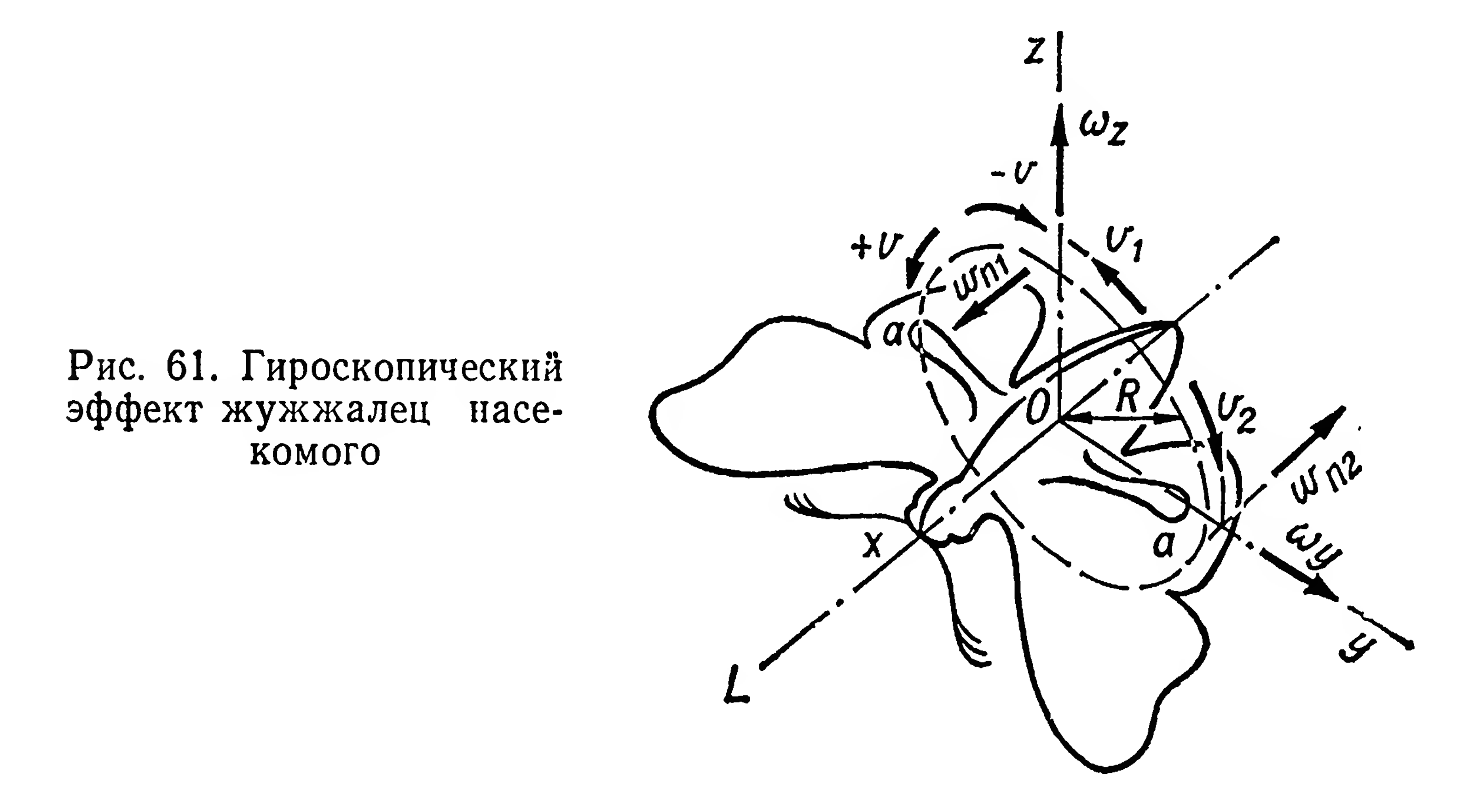



Рис. 61. Гироскопический эффект жужжалец насекомого

скоростью $\omega y$ или $\omega z$ массы утолщенных кончиков его жужжалец будут двигаться с поворотным ускорением, что и вызовет их отклонение от плоскости $yOz$. Жужжальца начнут деформироваться. Это воспринимается насекомым как сигналы об изменении первоначального направления полета [1, 18].

При приближении жужжалец к плоскости $xOz$ проекция их окружной скорости $v_1$ на ось $Oy$ будет почти совпадать с самой этой плоскостью, поэтому их поворотное ускорение $w_{п1}$ будет обусловлено в основном (см. рис. 23) угловой скоростью $\omega_z$ поворота насекомого вокруг оси $Oz$ на рис. 61. При приближении же к плоскости $xOy$ окружная скорость $v_2$ жужжалец будет проецироваться главным образом на ось $Oz$, и поворотное ускорение $w_{п2}$ будет определяться теперь значением угловой скорости $\omega_y$.

Как видим, величина и направление деформации жужжалец информируют насекомое об угловых скоростях $\omega_y$ и $\omega_z$ его поворотов, позволяя тем самым выполнять не только прямолинейный полет, но и производить необходимое маневрирование [3]. Опыты показывают, что при удалении жужжалец мухи лишаются способности управлять телом в полете и неизбежно падают.

Ранее отмечалось, что главная ось вращающегося гироскопа при отсутствии воздействующих на него моментов внешних сил сохраняет свое положение в пространстве неизменным. При этом остается постоянным и его кинетический момент, равный произведению момента инерции ротора на его угловую скорость.

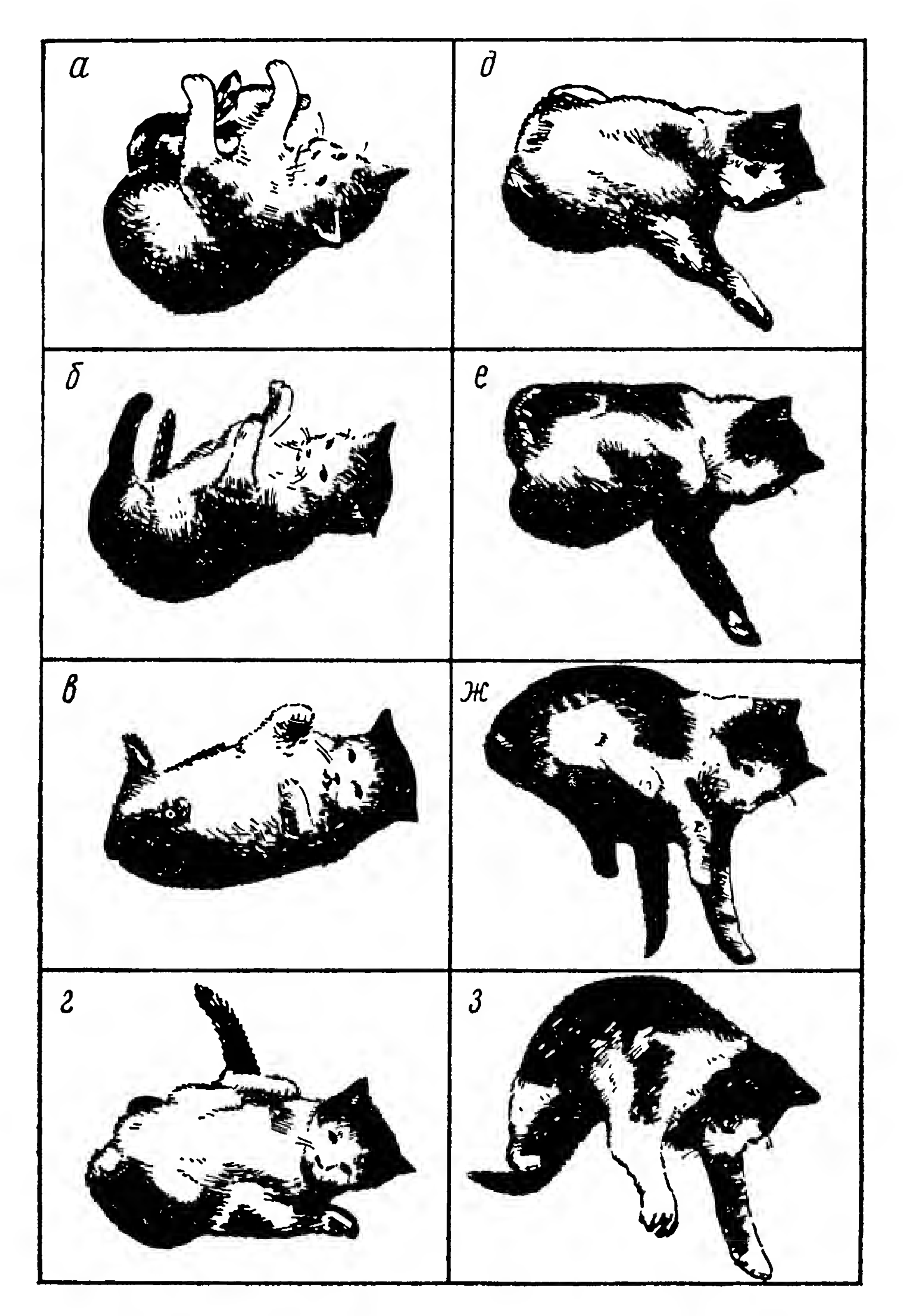



Рис. 62. Кинокадры поведения падающей кошки

Этот закон, справедливый для любых вращающихся тел, своеобразно используется некоторыми животными при свободном падении. Так, кошка, падающая с высоты спиной вниз, переворачивается в воздухе и приземляется на лапы [13]. Но вращение ей не сообщалось, и, следовательно, ее кинетический момент должен оставаться равным нулю. Как же ухитряется кошка сообщить себе угловую скорость, не обладая кинетическим моментом?

Ответ на этот вопрос был найден с помощью скоростной киносъемки. Полученные кадры [26], часть которых воспроизведена на рис. 62, позволяют проследить процесс переворачивания

животного. Результаты исследований [17] показали, что кошка, как только осознает свое падение (рис. 62, *а*), сразу же отставляет хвост и задние лапы как можно дальше в стороны, а передние, наоборот, поджимает к туловищу (рис. 62, *б*). В это же мгновение, скручивая свое тело, кошка начинает поворачивать голову и переднюю часть туловища вокруг своей продольной оси.

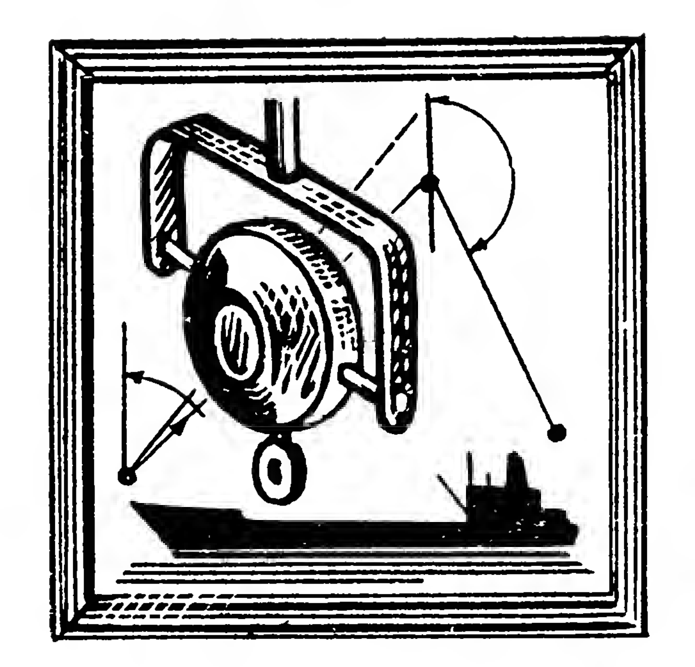
При этом кинетический момент животного относительно его продольной оси остается равным нулю. Поэтому, как только начинается вращение передней части туловища кошки, сразу же возникает противоположное вращение ее задней части; кинетические моменты обеих вращающихся половин тела будут равны по величине и противоположны по направлению.

Поскольку массы задних лап и хвоста на рассматриваемом этапе движения далеко отстоят от оси вращения, а передние лапы к ней приближены, то момент инерции задней половины туловища относительно этой оси будет значительно превосходить момент инерции его передней половины. В силу этого угловая скорость передней части животного будет больше скорости задней. В результате за одно и то же время передняя половина кошки повернется в направлении к читателю на больший угол, чем ее задняя половина — в противоположном направлении (рис. 62, *в*).

Затем начинается второй этап движения. Кошка теперь вытягивает передние лапы и поджимает задние, что ясно видно на рис. 62, *г*. Одновременно она начинает закручивать свое тело в обратном направлении, поворачивая переднюю часть туловища вокруг своей продольной оси теперь уже в направлении от читателя. Суммарный кинетический момент животного остается и на этом этапе равным нулю, поэтому задняя половина тела кошки сразу же начнет поворачиваться в направлении к читателю.

Кошка в начале последнего этапа движения изменила моменты инерции обеих половин своего тела: момент инерции ее передней части стал теперь меньше момента задней. Поэтому задняя половина туловища кошки поворачивается к читателю с большей угловой скоростью, чем ее передняя, которая вращается в противоположном направлении.

В результате за время этого этапа передняя часть туловища повернется вокруг продольной оси животного на меньший угол, чем задняя. Когда в конце его кошка опять вытянет задние лапы и подожмет передние (рис. 62, *д*), ее положение будет таким же, как и в начале первого этапа рассматриваемого движения (см. рис. 62, *б*). Однако теперь она окажется повернутой вокруг своей продольной оси на заметный угол. Быстро повторяя описанный цикл движений (рис. 62, *е*), кошка правильно ориентирует себя в пространстве (рис. 62, *ж*) и приземляется на все четыре лапы (рис. 62, *з*).





# IV

## ГИРОСКОП В МОРСКОМ ФЛОТЕ

### 16. Потребность мореплавателей в гироскопическом компасе

Для осуществления морского плавания по заранее намеченному маршруту *ABC*, который может быть проложен по карте, как показано на рис. 63, на судне необходимо иметь приборы, измеряющие скорость корабля *v* и его курс *K*. Последний характеризует угол, образуемый заданным направлением движения *AB* и меридианом *NS*. При выполнении этого требования

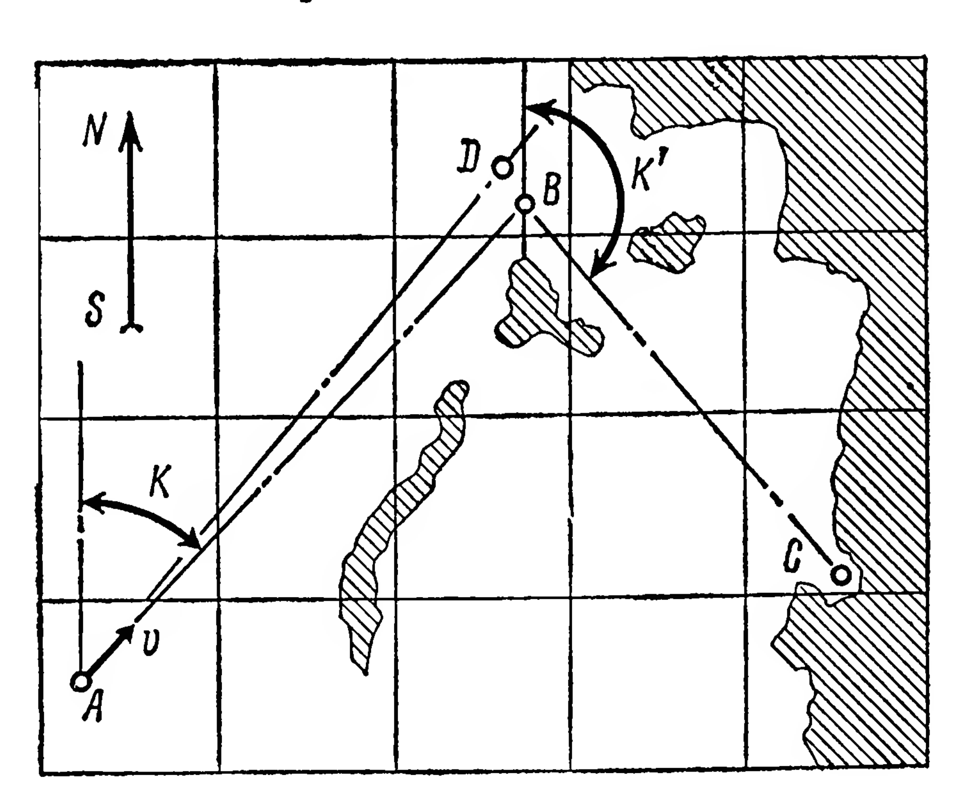



Рис. 63. Курс корабля, нанесенный на карту

становится возможным вычислить время, необходимое на переход судна из пункта *A* в пункт *B*, а также момент изменения его курса с *K* на *K'*. Чем точнее приборы, определяющие курс, скорость и время его движения, тем более оптимально будет пройден маршрут *ABC* и обеспечится большая уверенность в приходе корабля в назначенное время в конечный пункт *C*.

Особо важное значение для мореплавания имеют измерители курса *K*. Ошибка в его измерении даже на доли градуса может привести к тому, что судно будет двигаться уже не по заданному направлению *AB*, а по отклоненной прямой *AD*. Из-за этого при плавании на большие расстояния судно может пройти на

значительном удалении от намеченного пункта $B$. Необходимое изменение курса будет осуществлено в этом случае уже не в заданной точке $B$, а в некоторой другой точке $D$. Поэтому привести корабль в пункт $C$ в условиях плохой видимости будет затруднительно.

Человеческая мысль еще в древности работала над созданием такого прибора, который позволил бы с необходимой точностью и в любую погоду определять курс судна при движении его в открытом море. Люди применяли для этой цели магнитную стрелку, которая на протяжении многих столетий удовлетворяла запросы мореплавателей. Но с увеличением грузоподъемности судов, когда их корпуса начали изготовлять из стали, точность работы магнитного компаса резко снизилась.

Железные массы корабля, мощные генераторы, вырабатывающие электрическую энергию, и потребляющие ее исполнительные устройства вызывали отклонения магнитной стрелки от меридиана на большие углы, что не удовлетворяло требованиям развивающегося мореплавания. Кораблестроители интенсивно искали новые пути создания компаса, на показания которого не влияли бы ни железная масса корабля, ни электрический ток, текущий по кабелям, ни какие-либо другие возмущающие факторы.

## 17. Гироскопический компас Фуко

Производя опыты с гироскопом, Л. Фуко еще в 1852 г. обнаружил, что при удерживании его главной оси в плоскости горизонта она приходит к совмещению с плоскостью географического меридиана. Тем самым открывалась возможность создания гироскопического компаса, на поведение которого не оказывают влияние перечисленные выше возмущения.

Представим себе гироскоп с двумя степенями свободы, установленный на экваторе в некотором пункте земной поверхности $L$ так, чтобы его ось $CC$ была вертикальна, а ось $AA$ была бы направлена с запада на восток. Этот случай иллюстрирует рис. 64. Описанный гироскоп будет участвовать в суточном вращении Земли, поворачиваясь вместе с нею вокруг оси $NS$ с угловой скоростью $\Omega_з$. Однако масса ротора, сопротивляясь этому вынужденному повороту, который обусловлен поворотным ускорением, начнет вращение оси $CC$, вызывая движение вектора $\Omega$ к совмещению с вектором $\Omega_з$ указанного поворота.

Описанное движение прекратится после совмещения оси $AA$ гироскопа с полуденной линией $ns$, которая на экваторе параллельна земной оси $NS$. Нетрудно заметить, что главная ось гироскопа приходит в данном случае к совмещению с плоскостью меридиана. Таким образом, мы приходим к прибору, известному как гироскопический компас. Устанавливаемый в общем случае на любой географической широте земной поверхности гирокомпас Фуко будет совмещать ось вращения ротора $AA$ с проекцией

вектора $\Omega_з$ на полуденную линию, попадая в плоскость географического меридиана. Исключением будут являться лишь пункты земной поверхности, расположенные вблизи полюсов $N$ и $S$, где горизонтальная проекция вектора $\Omega_з$ равна нулю (см. рис. 53).

Совмещение гирокомпаса Фуко с плоскостью меридиана можно продемонстрировать на описанной ранее (см. рис. 54) модели гироскопа на земной поверхности. Лишите смонтированный на глобусе гироскоп свободы вращения вокруг внутренней оси подвеса и совместите его наружную ось с радиусом глобуса. Сообщите ротору гироскопа вращение вокруг главной оси, а затем

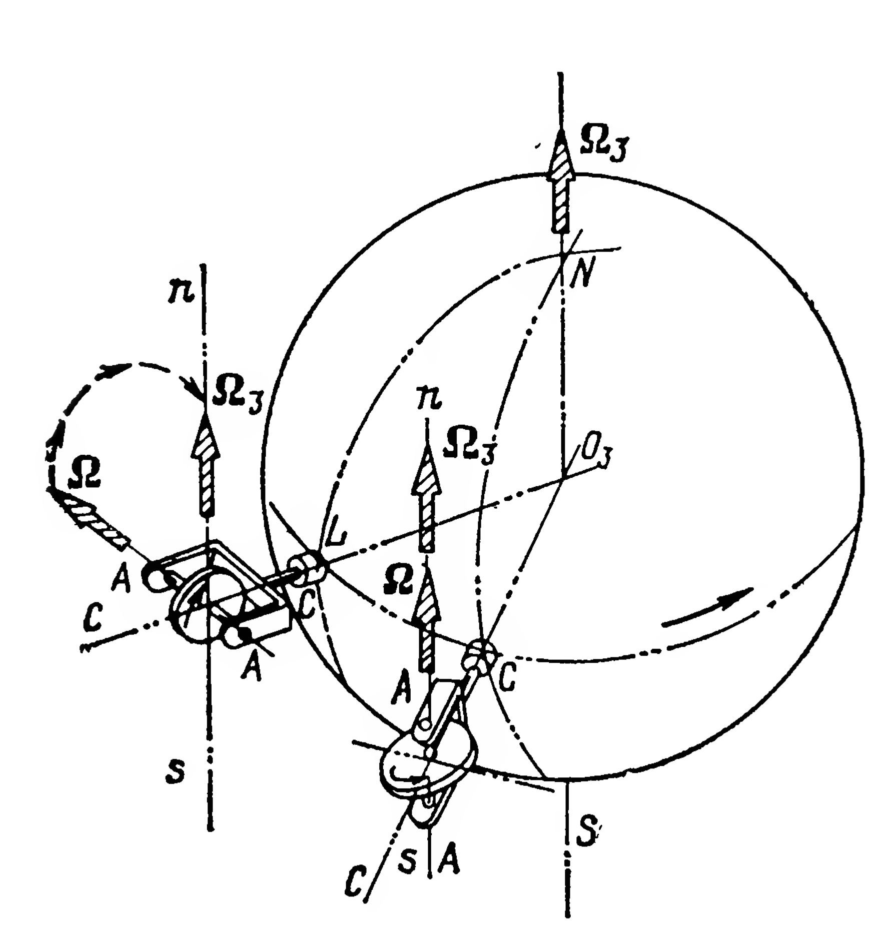



Рис. 64. Принцип работы гирокомпаса Фуко

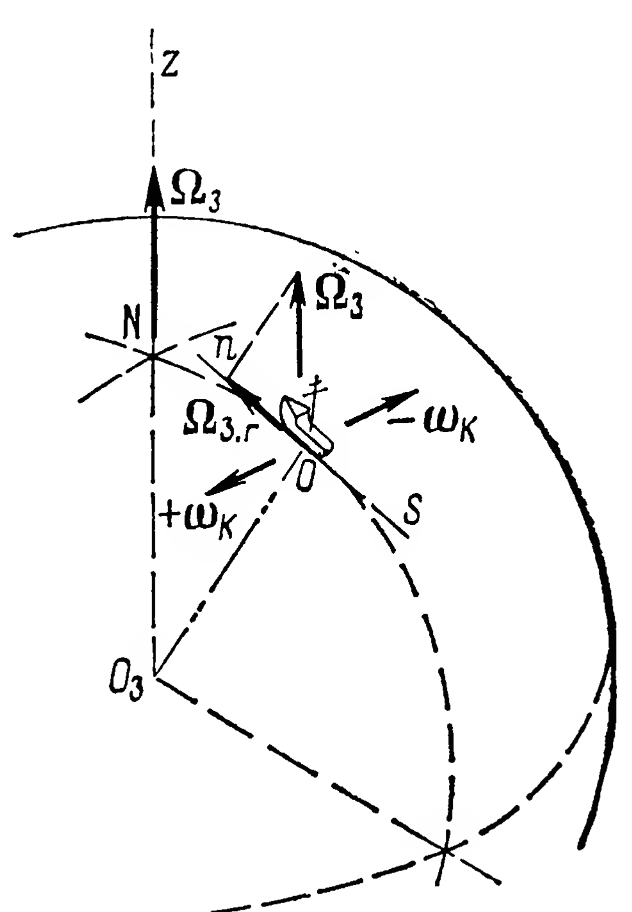



Рис. 65. К объяснению невозможности практического использования гирокомпаса Фуко на корабле

поворачивайте глобус вокруг его оси $NS$. Вы увидите, что главная ось совместится с меридиональной плоскостью глобуса.

Однако гирокомпас Фуко не получил практического применения в морском флоте. Дело в том, что при перемещении корабля по неспокойному морю его корпус, как показано на рис. 65, будет то зарываться носовой частью в волны, поворачиваясь вокруг своей поперечной оси с угловой скоростью $+\omega_к$, то подниматься на гребень волны, поворачиваясь в противоположном направлении с угловой скоростью $-\omega_к$.

Вынужденный поворот гироскопа в этих условиях будет определяться не только суточным вращением Земли, но и качкой судна. Главная ось гироскопа теперь будет совмещаться уже не с плоскостью географического меридиана $nOZ$, в которой находится вектор горизонтальной составляющей $\Omega_{з.г}$ угловой скорости $\Omega_з$ суточного вращения Земли, а с направлением результирующего его вектора обеих угловых скоростей $\Omega_{з.г}$ и $\pm\omega_к$.

Угловая скорость $\omega_к$, достигающая у некоторых конструкций судов значение 10° в секунду, во много раз превышает $\Omega_{з.г}$, являющуюся проекцией угловой скорости суточного вращения Земли $\Omega_з$ и равную 0,004 град/с. Последнее значение определяется поворотом Земли на 360° за 24 часа. Поэтому главная ось гирокомпаса практически стремится теперь к совмещению с вектором $\omega_к$, а не с $\Omega_{з.г}$, как это наблюдалось при неподвижном основании прибора (см. рис. 64). В связи же с колебаниями судна ось гироскопа за один их период, равный примерно 7—10 секундам, будет дважды поворачиваться вокруг оси $O_зZ$ на угол, близкий к 180°. Гирокомпас Фуко в этих случаях уже не будет приходить к совмещению с плоскостью $nOZ$ меридиана, совершая около него колебания с амплитудой, близкой к 90°.

По указанным причинам гирокомпас Фуко и не получил практического использования в мореплавании. Потребовалось несколько десятилетий напряженных исследований, прежде чем был создан мореходный гироскопический компас, успешно работающий при волнении. Но и гирокомпас Фуко нашел себе практическое применение в тех случаях, когда определение плоскости меридиана производится на неподвижном относительно земной поверхности основании.

## 18. Практическая модель гироскопического компаса

В результате многолетних исследований была найдена возможность создать гирокомпас, нормально работающий на колеблющемся на волнении судне. В основу этого прибора был положен гироскоп с тремя степенями свободы (см. рис. 16). Принцип его установки поясняет рис. 66. К внутреннему кольцу $BK$ гирокомпаса, выполненному в виде камеры, внутри которой вращается ротор, подвешивался груз $Q$ весом $G$. Этот груз стремился удерживать главную ось $AA$ *гироскопа* в плоскости горизонта, так как центр тяжести прибора был смещен относительно внутренней оси подвеса $BB$ на величину $l$.

Если такой прибор, названный **гироскопическим компасом с маятником**, установить на земной поверхности, то через некоторое время его главная ось совместится с плоскостью географического меридиана. В самом деле, представим, как показано на рис. 67, что гирокомпас установлен на земной поверхности в пункте *1* таким образом, что в начальный момент времени его главная ось $AA$ горизонтальна и направлена с запада на восток. В этом случае сила $G$ тяжести маятника, проходя через точку подвеса $O$, не будет создавать действующий на гироскоп момент.

Однако с течением времени место установки, перемещаясь вследствие суточного вращения Земли в пространстве, займет положение *2*. При этом гироскоп, стремясь сохранить направление своей главной оси $AA$ неизменным в пространстве, начнет

наклоняться к плоскости горизонта. Восточный конец оси $AA$ будет подниматься над горизонтом, а западный — опускаться. Сила тяжести $G$ выйдет из совмещения с наружной осью $CC$

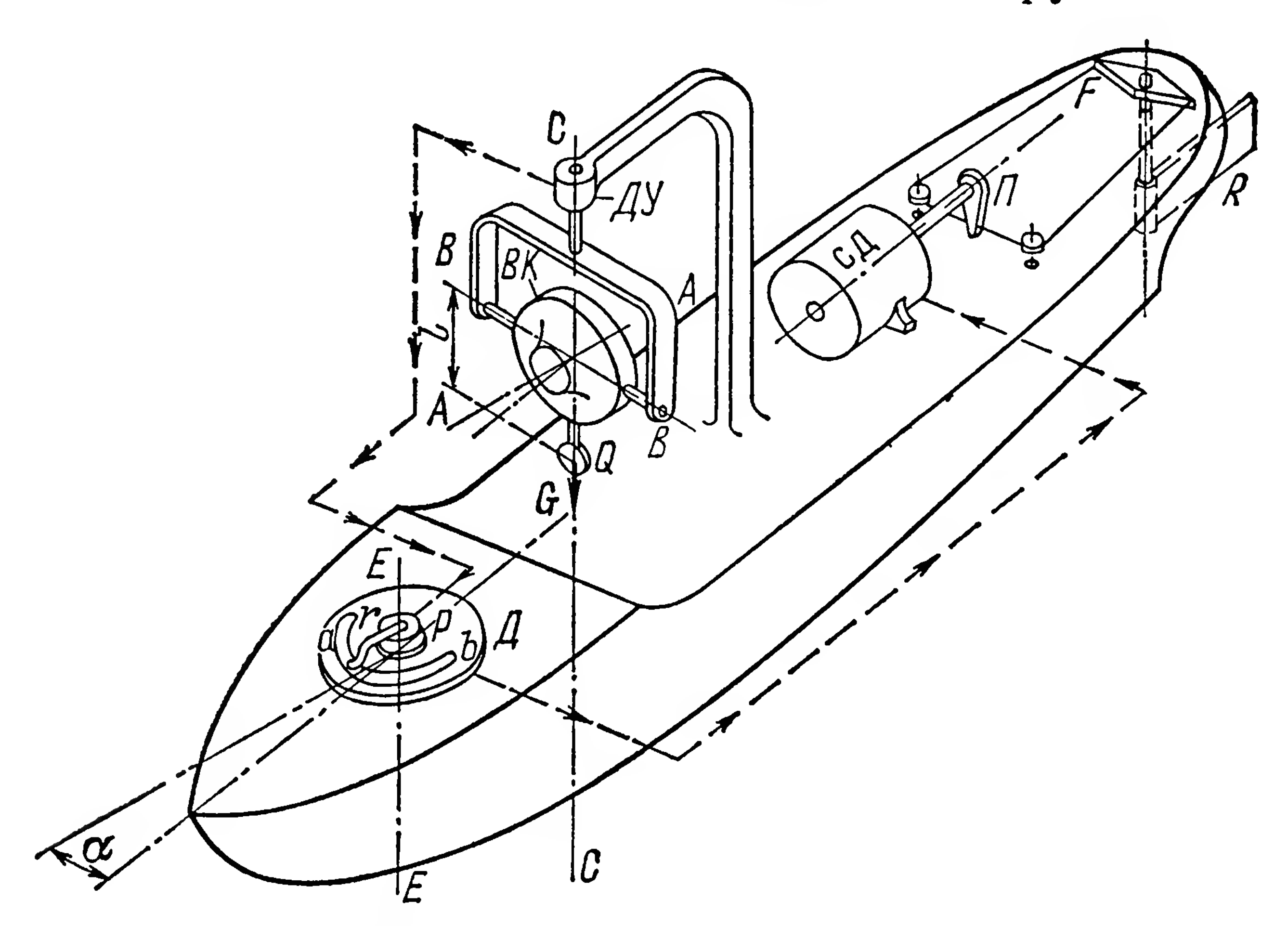



Рис. 66. Установка гирокомпаса на корабле

подвеса гироскопа и создаст относительно точки $O$ момент $M$, вектор которого совпадет с осью $BB$ и будет направлен на читателя, чему на рисунке соответствует положение 3.

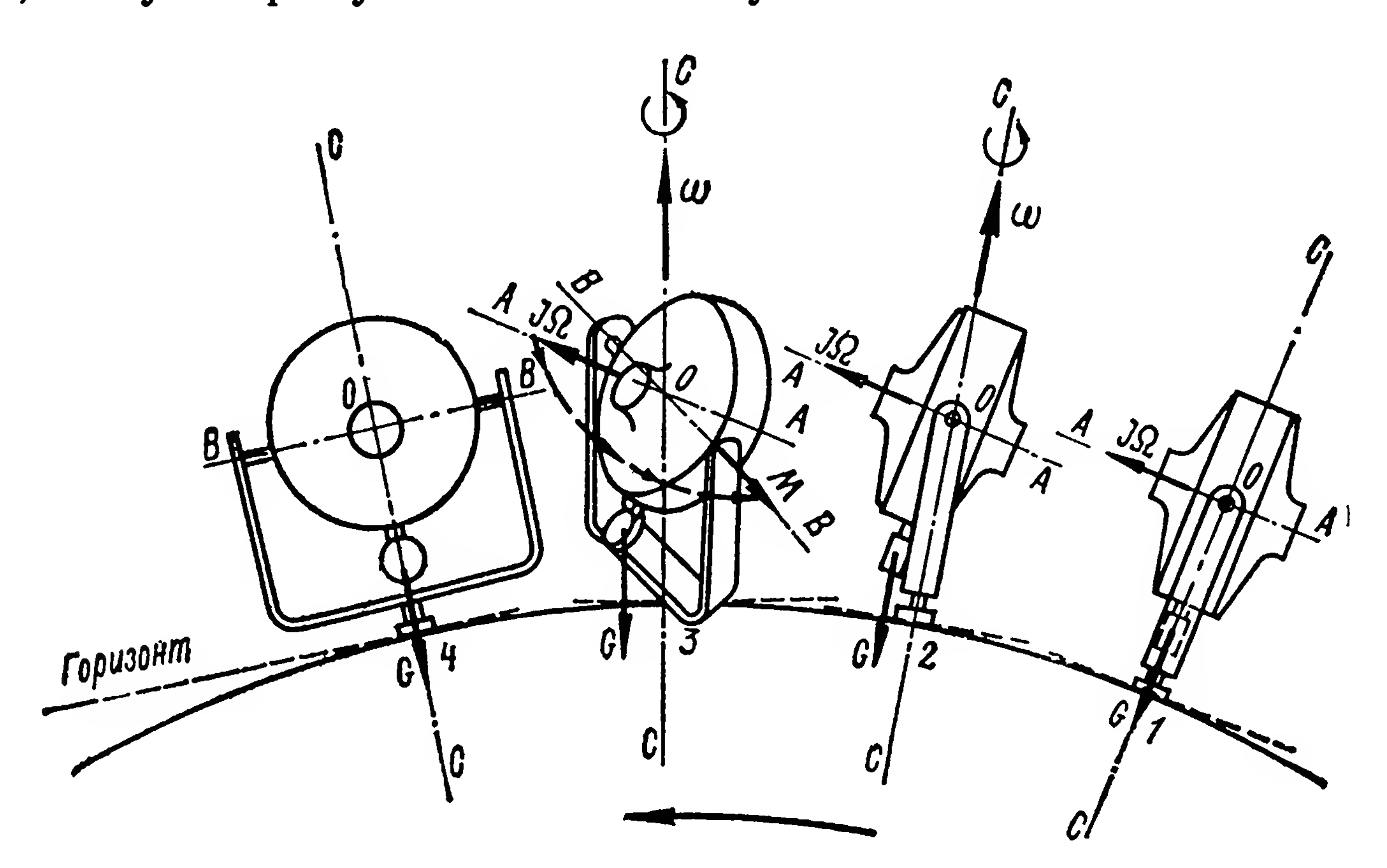



Рис. 67. Принцип работы гирокомпаса с маятником

Под влиянием момента $M$ у гироскопа возникнет прецессионное движение, главная ось $AA$, а следовательно, и вектор кинетического момента $I\Omega$ гироскопа пойдут на совмещение с вектором внешнего момента $M$. Гироскоп начнет поворачиваться вокруг наружной оси $CC$ с угловой скоростью $\omega$, определяемой по формуле (7). Описанное движение будет происходить до тех

пор, пока ось *АА* гироскопа не совместится с плоскостью географического меридиана (на рисунке положение *4*). Гироскоп, как видим, превратился в гироскопический компас. Описанный принцип создания гирокомпаса не является единственно возможным. Существуют гирокомпасы с ртутными сосудами, с управляемыми электрическими датчиками моментов и ряд других разновидностей. Однако их сущность остается такой же.

В настоящее время гирокомпас представляет собой сложный прибор, используемый не только для навигационных целей, но и для автоматического удержания судна на заданном курсе, для записи пройденного пути и для стабилизации судовых прожекторов в азимутальном направлении. Модель мореходного гирокомпаса, надежно работающая в условиях качки корабля, была получена не сразу. Потребовалось более пяти десятилетий для практического осуществления идеи такого прибора, призванного точно воспроизводить на корабле направление географического меридиана.

Долгое время технически не представлялось возможным обеспечить вращение ротора гироскопа вокруг главной оси с достаточно высокой скоростью. Использование для этой цели сжатого воздуха было сопряжено с рядом недостатков. При низких температурах воздуха давление в трубопроводах воздушной системы падало и ротор гирокомпаса резко снижал частоту вращения, ухудшая тем самым качество работы прибора. При передаче воздуха через детали опор, соединяющих кольцо карданова подвеса друг с другом, а также с корпусом прибора, несмотря на применение специальных уплотнителей, происходила значительная его утечка. Все это приводило к увеличению значений моментов сил трения в опорах подвеса и не обеспечивало сохранения постоянства скорости собственного вращения ротора гироскопа, резко снижая тем самым точность прибора.

Только после того как впервые в истории техники знаменитый русский ученый Б. С. Якоби создал в 1865 г. гироскоп с электрическим приводом [41], проблема сохранения постоянства частоты вращения ротора была разрешена. Но и сразу после этого гироскопические приборы еще не вышли за рамки опытных образцов. Лишь с момента изобретения шариковых подшипников они обрели прочную техническую базу. Уже в 1905 г. лейтенант Балтийского флота М. Конокотин разработал первый механический компас, названный им «механическим компасом-гироскопом» [4]. Гирокомпас имел ряд недостатков, основным из которых было значительное влияние качки корабля на показания прибора. Однако работы Конокотина положили начало практическому использованию гироскопа для определения на море направления географического меридиана.

Модель гирокомпаса, надежно работающего в условиях качки, была создана только в 1914 г. С этого времени начинается следующий, более интенсивный этап развития гирокомпасов. Их стали изготовлять во многих странах. В Советском Союзе гиро-

скопическое приборостроение начало быстро развиваться после Великой Октябрьской революции. Этому развитию во многом содействовали своими трудами академик А. Н. Крылов и профессор Б. И. Кудревич. При их непосредственном участии в годы первой пятилетки был создан советский гирокомпас «ГУ-1», успешно выдержавший испытания в сложных арктических условиях.

В период 1935—1937 гг. группой специалистов под руководством А. Н. Крылова был создан двухгироскопный компас, а спустя несколько лет — новый малогабаритный гирокомпас. Благодаря непрерывному совершенствованию конструкции и технологических методов изготовления гирокомпасов все советские корабли оборудованы надежными отечественными приборами.

## 19. Гироскопический рулевой

Выше отмечалось, что гирокомпас позволил автоматизировать многие процессы управления и контроля за движением судна и, в частности, его удержание на заданном курсе. Для работы такого автомата, показанного на рис. 66, который называется *гироскопическим рулевым*, гирокомпас снабжают специальной следящей системой, состоящей из датчика угла *ДУ* и повторителя, или так называемого репитера *Р*. При изменении курса корабля в датчике угла возникает электрический сигнал, пропорциональный значению угла поворота судна, который передается на двигатель репитера *Р*.

Воздействие сигнала вызывает поворот вала репитера вокруг оси *ЕЕ* на угол, равный углу отклонения корабля от заданного курса. На валу репитера *Р* жестко укреплен контактный рычаг *r*, а на диске *Д* задатчика курса имеются две изолированные ламели *a* и *b*. При этом сам диск *Д* может поворачиваться относительно корпуса корабля вокруг оси *ЕЕ* на любой угол. Угол $\alpha$, образуемый продольной осью судна и радиусом диска *Д*, который проходит через изоляционный промежуток между ламелями *a* и *b*, определяет заданный курс.

При прямолинейном движении корабля рычаг *r* находится на изоляционном промежутке диска *Д*, и автомат рулевого управления удерживает руль *R* судна в нейтральном положении. В случае же изменения курса гирокомпас, сохраняя положение оси *АА* неизменным относительно плоскости меридиана, изменяет свою ориентацию относительно корпуса судна. Тем самым гирокомпас дает сигнал о том, что курс корабля отличается от заданного. Одновременно на тот же угол отклонения судна от требуемого курса повернется и рычаг *r* репитера *Р*, замыкая одну из ламелей *a* или *b*.

Снимаемый с последней электрический ток подается на силовой двигатель *СД*, вал которого повернет поводок *П* и связанный с ним стальным тросом рычаг *F* руля *R*. Поворот послед-

него и создает момент, обеспечивающий возвращение судна на заданный курс.

Механизм гироскопического рулевого, как показано на рис. 68, монтируется обычно внутри колонки *ГР* репитера *Р*, устанавливаемой на капитанском мостике. Ось вращения штурвала гирорулевого связывается силовой синхронной передачей с приводом рулевого управления, благодаря чему гирорулевой автоматически воздействует на штурвал рулевого управления,

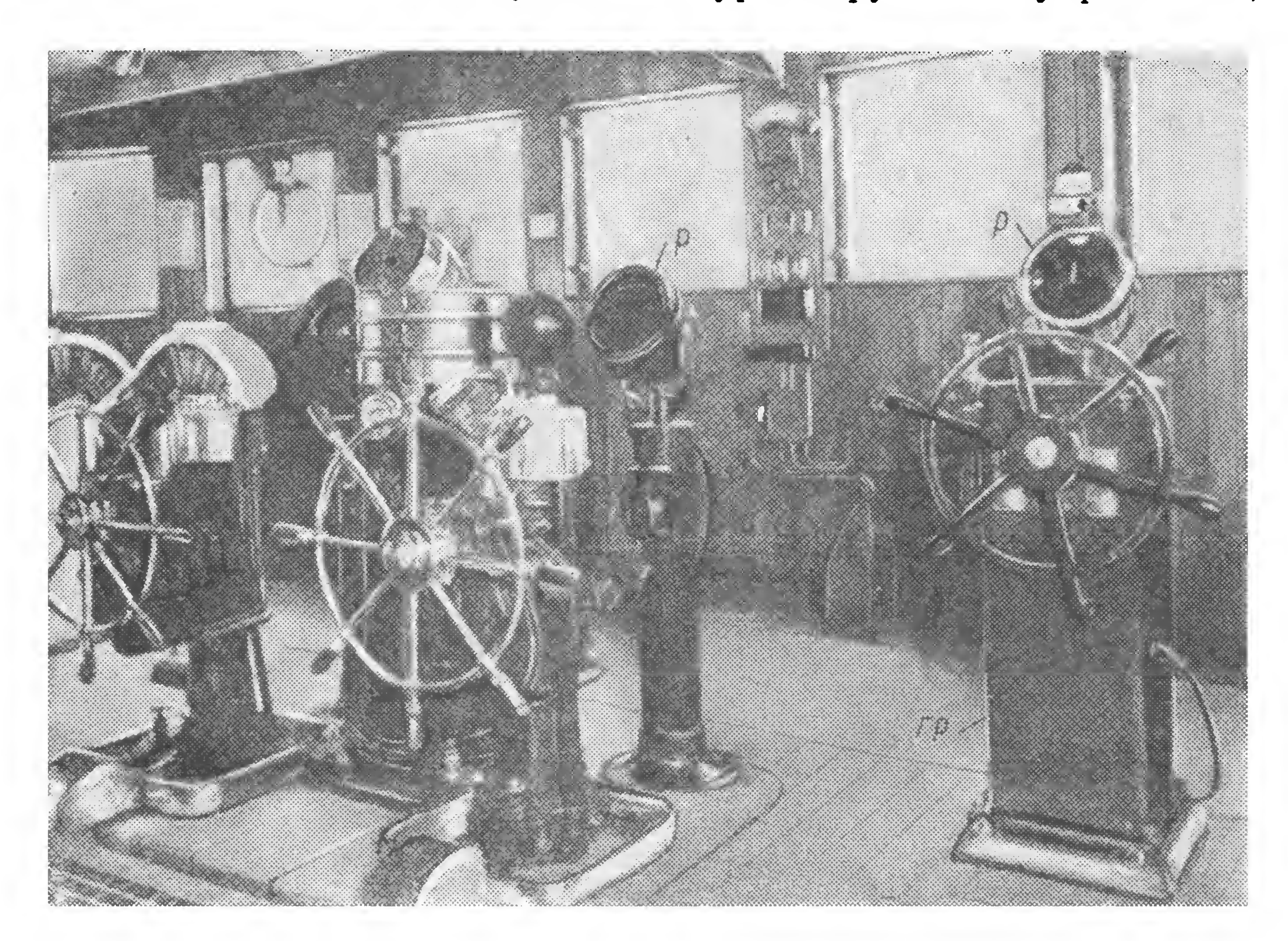



Рис. 68. Репитер гирокомпаса и гирорулевой на капитанском мостике

производя при отклонении судна от заданного курса необходимую перекладку руля. Непрерывное воздействие гирорулевого на механизм управления судна обеспечивает автоматически без участия человека движение его по заданному курсу.

## 20. Гироскопический указатель географической широты местности

Гироскопические свойства быстровращающихся тел, как уже говорилось выше, могут быть использованы и для определения географической широты местности любого пункта земной поверхности. Представим себе гироскоп с двумя степенями свободы, для чего обратимся к рис. 69. Его внутреннее кольцо *ВК*, несущее ротор *Р*, монтируется в корпусе *К* прибора. Выберем на земной поверхности пункт *L* и закрепим на нем корпус *К* так, чтобы главная ось *АА* гироскопа могла перемещаться только в

плоскости географического меридиана. При этом условии его ротор $P$ будет вынужден вращаться одновременно вокруг двух осей.

Собственное вращение ротора будет происходить вокруг оси $AA$ с угловой скоростью $\Omega$, а вынужденный поворот, который вызывается суточным вращением Земли, — вокруг оси $DD$, параллельной земной оси $NS$, с угловой скоростью $\Omega_з$. В результате главная ось $AA$ гироскопа в соответствии с правилом, изложенным в разделе 11 (также см. рис. 29), совместится с осью $DD$ вынужденного поворота в положении $L^*$.

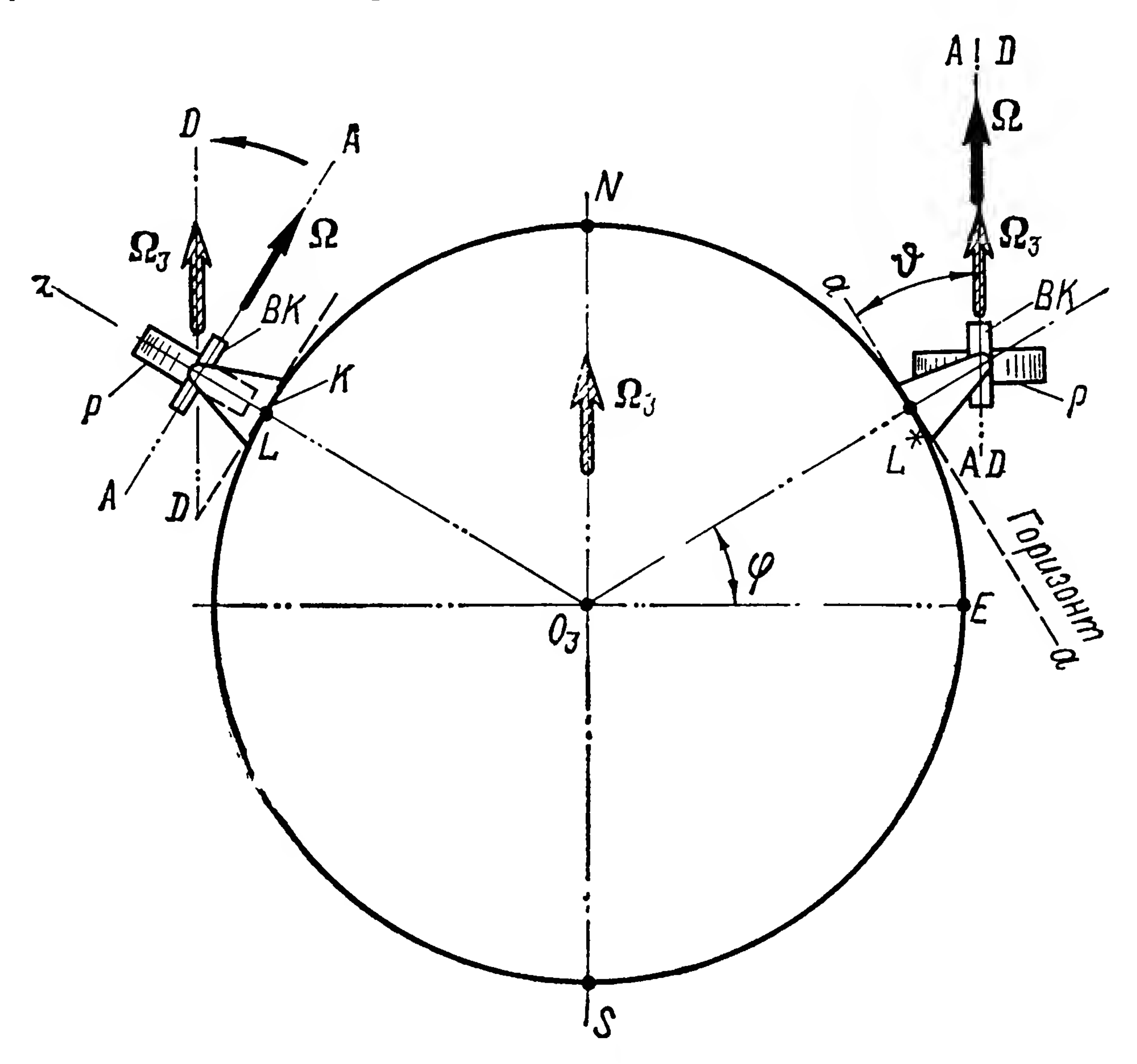



Рис. 69. Принцип работы гирошироты

Прямые $O_зL^*$ и $aa$, а также $O_зE$ и $DD$ взаимно перпендикулярны, поэтому углы $\vartheta$ и $\varphi$ равны между собой. По значению угла $\vartheta$ наклона оси $AA$ к плоскости горизонта можно судить и об угле $\varphi$ географической широты места.

Описанный гироскопический указатель географической широты долгое время не могли осуществить на практике из-за значительных моментов сил трения в опорах его подвеса. Однако в конце 50-х гг. были найдены методы использования гироскопа для определения не только широты, но и географической долготы любого пункта на земной поверхности [31].

## 21. Гироскопические успокоители качки корабля

Гироскоп нашел применение также и в качестве успокоителя бортовой качки корабля. История изобретения последнего весьма интересна. В начале нашего столетия в Германии был построен

пароход для сообщения между курортами на побережье Балтийского моря. В связи с мелководьем в районе его использования он имел малую осадку и поэтому был сильно восприимчив к качке. Даже незначительное волнение приводило к столь большим кренам судна, что пассажиры стали избегать поездок на нем. В целях исправления положения пароходная компания начала поиск методов уменьшения его качки на волнении. Такой метод был вскоре найден О. Шликом, предложившим для решения поставленной задачи использовать свойства гироскопа.

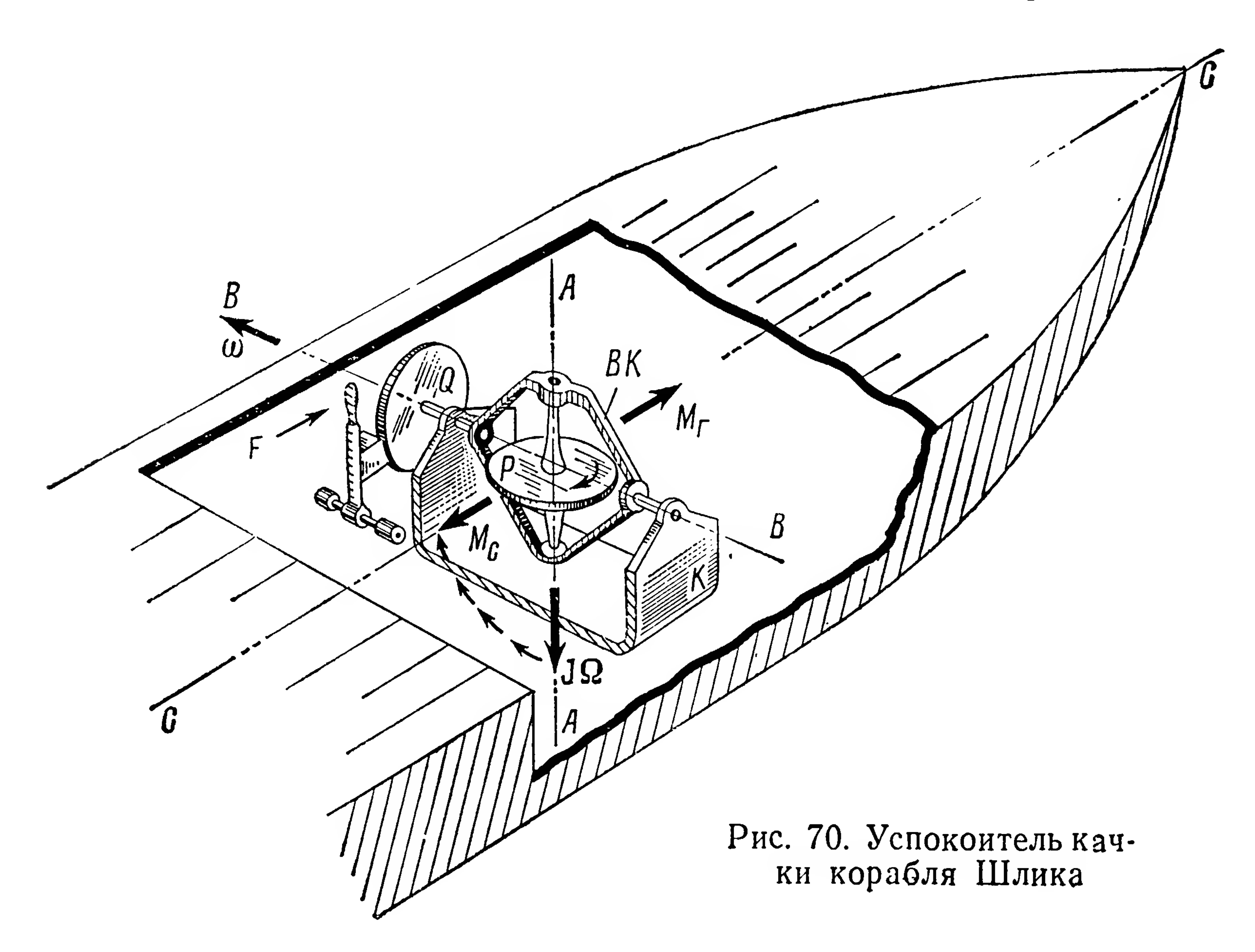



Рис. 70. Успокоитель качки корабля Шлика

Устройство, изображенное на рис. 70, состояло из гироскопа, массивный ротор $P$ которого монтировался в кольце $BK$ на подшипниках, обеспечивающих свободу его вращения вокруг оси $AA$. Само кольцо $BK$ монтировалось на подшипниках в корпусе $K$, жестко закрепленном на судне. Тем самым ему совместно с ротором $P$ обеспечивалась свобода вращения вокруг оси $BB$, перпендикулярной продольной оси $CC$ парохода. Вращение же гироскопа вокруг последней было возможно только совместно с корпусом судна.

В системе гироскопического успокоителя предусматривался тормоз, шкив $Q$ которого соединялся с кольцом $BK$. Тормозное устройство позволяло, воздействуя на шкив $Q$ усилием $F$, снижать скорость вращения гироскопа вокруг оси $BB$. В тех случаях, когда судно должно было совершать переходы по морю в бурную погоду, ротор $P$ приводился во вращение вокруг оси $AA$ с максимально возможной угловой скоростью $\Omega$. Развивая при этом кинетический момент $I\Omega$, гироскоп приобретал способность

сопротивляться действующим на него внешним возмущающим моментам.

Волны, стремящиеся наклонить судно на борт, приводят к воздействию на его корпус момента возмущающей силы, который, в свою очередь, передается гироскопу. При подходе волны с правого борта, стремящейся повернуть пароход вокруг продольной оси $CC$ и тем самым наклонить его влево, проявление энергии волн можно представить в виде внешнего возмущающего момента $M_C$, который действует на гироскоп относительно оси $CC$. Под влиянием $M_C$ начинается движение гироскопа вокруг оси $BB$ с угловой скоростью ω, равной согласно формуле (7) величине $\frac{M_C}{I\Omega}$. Как только гироскоп, вращающийся вокруг оси $AA$ с угловой скоростью Ω, получит дополнительное вращение вокруг оси $BB$, сразу же возникнет гироскопический момент $M_г$, равный $I\Omega\omega$ и направленный противоположно внешнему моменту $M_C$.

Действуя через опоры, расположенные на оси $BB$, на корпус парохода, гироскопический момент $M_г$ уравновесит внешний момент $M_C$. Однако в процессе стабилизации судна ось $AA$ гироскопа пойдет на совмещение с осью $CC$ (см. рис. 29) действия возмущающего момента $M_C$. Для исключения указанного совмещения, которое привело бы к исчезновению гироскопического момента и прекращению стабилизации судна, производится снижение скорости движения гироскопа вокруг оси $BB$ с помощью тормозного шкива $Q$.

При торможении гироскопа происходит превращение энергии его движения в тепловую. Оно несколько снижает угловую скорость ω прецессии гироскопа по сравнению с необходимой ее величиной $\frac{M_C}{I\Omega}$. В силу этого гироскопический момент не полностью компенсирует возмущающий момент $M_C$. Хотя в результате качка парохода резко снижается, однако полностью она не прекращается.

Испытания показали, что включение гироскопического успокоителя снижает качку судна в два-три раза, причем амплитуда колебаний гироскопа вокруг оси $BB$ при этом не превышает 30—40°. Однако гироскопический успокоитель Шлика из-за сложности управления его тормозным устройством не получил широкого применения. Для каждой частоты следования волн он требовал подбора оптимального усилия $F$, которое имеет тенденцию изменяться с течением времени из-за попаданий между трущимися поверхностями тормозного устройства как смазки, так и влаги.

Известный русский ученый А. Н. Крылов в 1909 г. предложил более совершенный образец гироскопического успокоителя бортовой качки корабля на волнении. Два года спустя аналогичное устройство было создано в Америке Э. Сперри. В новом варианте успокоителя, показанном на рис. 71, кольцо $BK$ гиро-

скопа было снабжено не тормозным шкивом, а зубчатым колесом $D$, которое через редуктор было связано с валом электродвигателя $ЭД$.

В новом успокоителе был применен второй контрольный гироскоп $КГ$ малых размеров, обладающий свободой вращения вокруг осей $A'A'$ и $B'B'$. При действии возмущающего момента, стремящегося повернуть судно вокруг оси $CC$, контрольный гироскоп $КГ$ стремится совместить свою ось $A'A'$ с продольной осью $CC$. В результате контактный рычаг $r$, жестко укрепленный на кольце гироскопа $КГ$, замыкает одну из ламелей ($a_1$ или

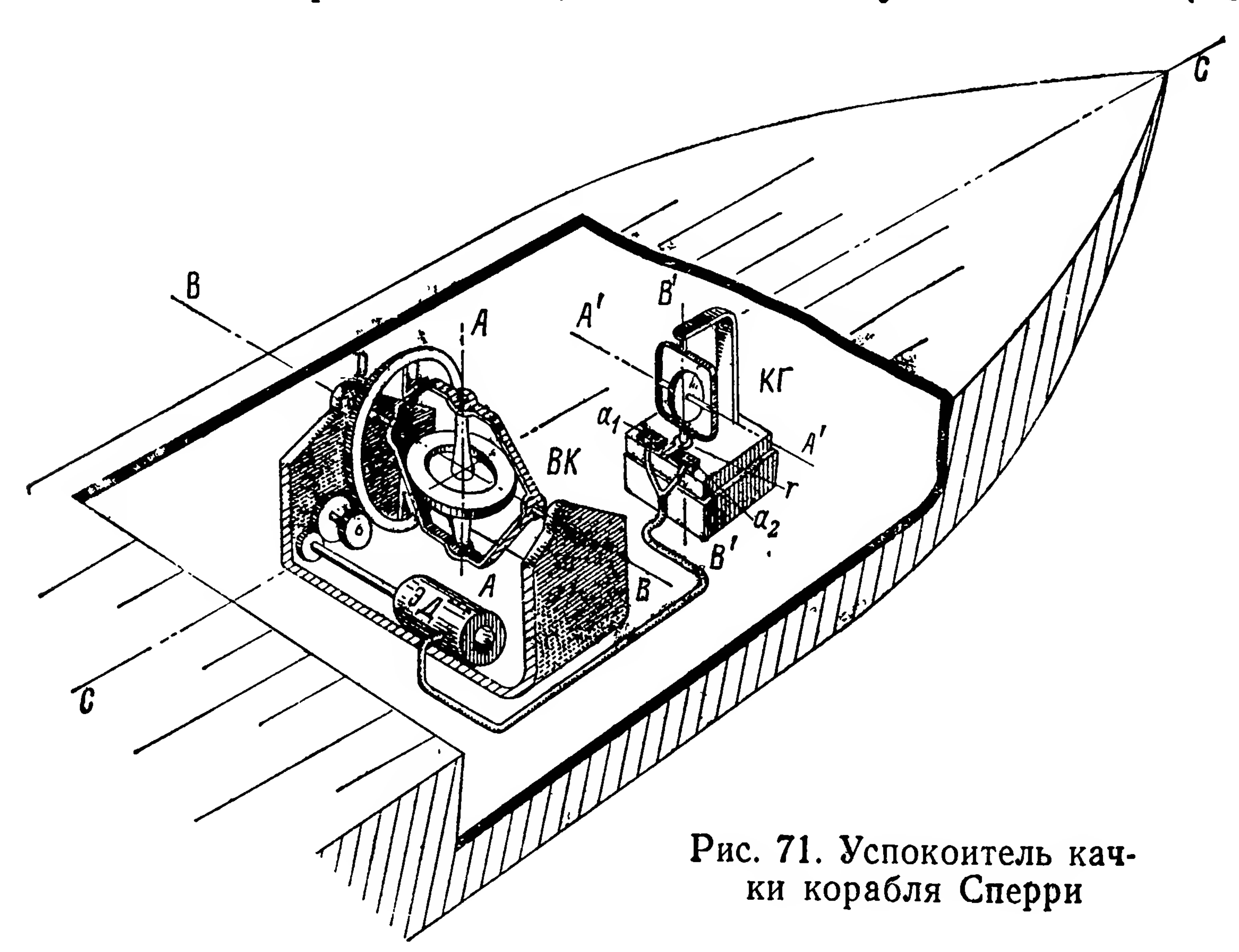



Рис. 71. Успокоитель качки корабля Сперри

$a_2$), расположенных на корпусе прибора. При этом подается ток на электродвигатель $ЭД$, который приводит во вращение основной гироскоп вокруг оси $BB$ в направлении, ведущем к взаимному уравновешиванию гироскопического и возмущающего моментов.

Размеры и вес описываемого гироскопического успокоителя качки значительны. В некоторых его моделях диаметр ротора основного гироскопа достигал 4 м, его масса — 110 т. Однако по отношению к общей массе судна масса ротора составляла лишь около 1 %.

## 22. Успокоитель качки корабля с управляющим гироскопом

Для успокоения качки корабля часто используются стабилизаторы с управляющими гироскопами. Корабль в этом случае снабжается по бортам отсеками, из которых могут выдвигаться за пределы корпуса небольшие боковые управляемые рули, показанные на рис. 72. В тихую погоду они убираются внутрь кор-

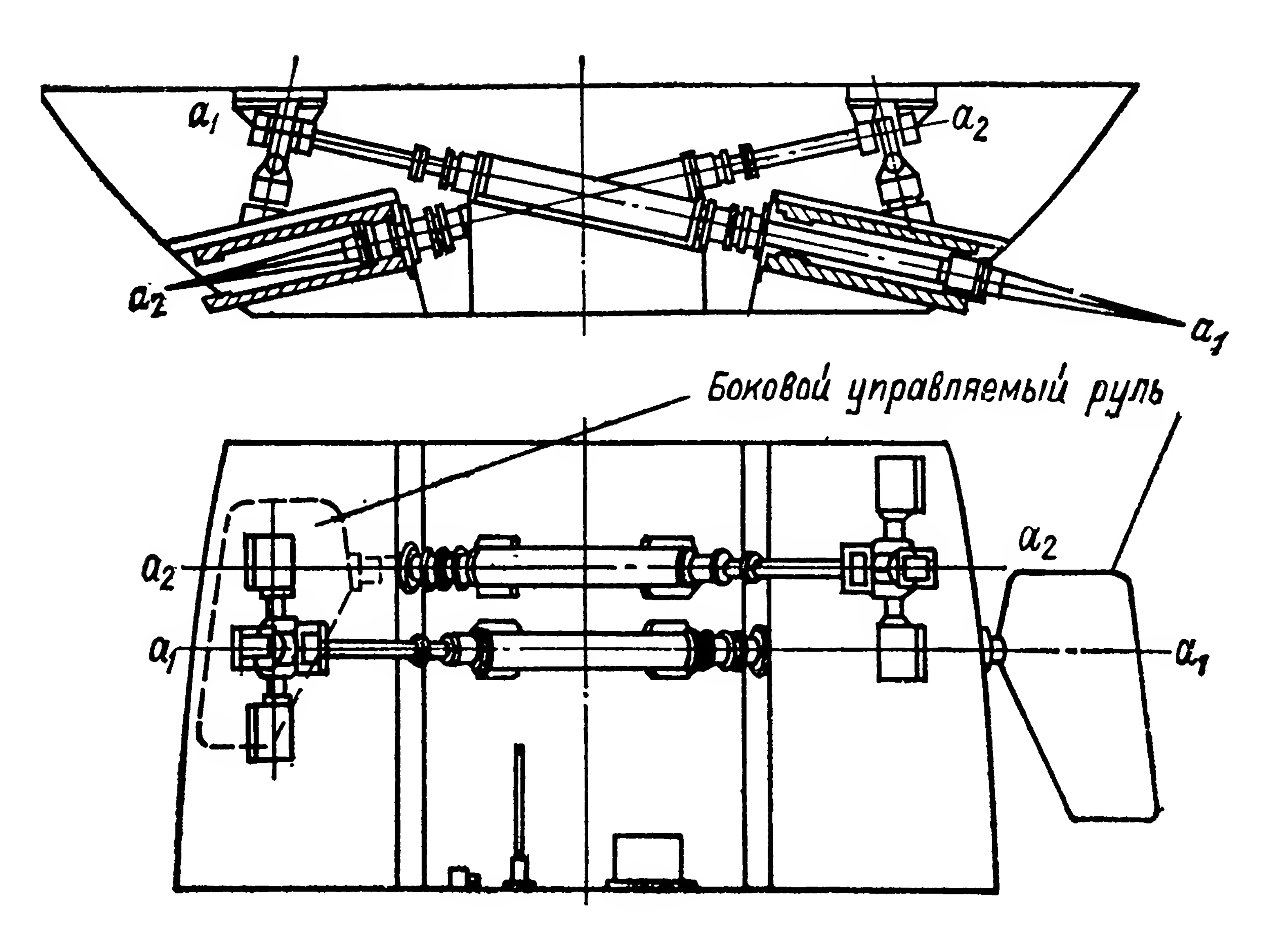



Рис. 72. Устройство боковых управляемых рулей

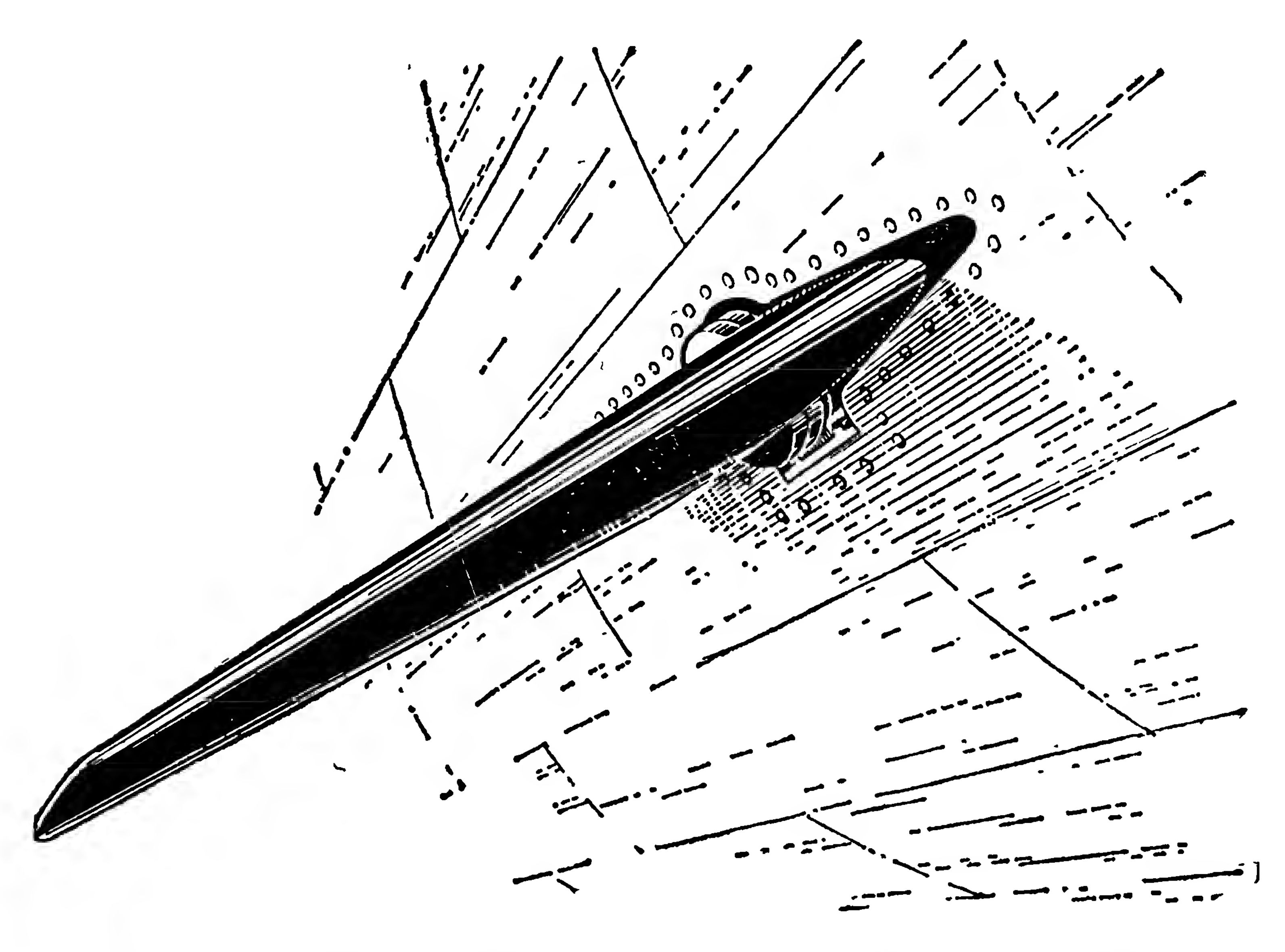


Рис. 73. Боковой управляемый руль, выдвинутый за корпус судна

пуса, как это изображено на рисунке слева, и поэтому не оказывают сопротивления движению. При волнении на море боковые рули выдвигаются за пределы корпуса, как это изображено на рис. 72 справа и отдельно показано на рис. 73.

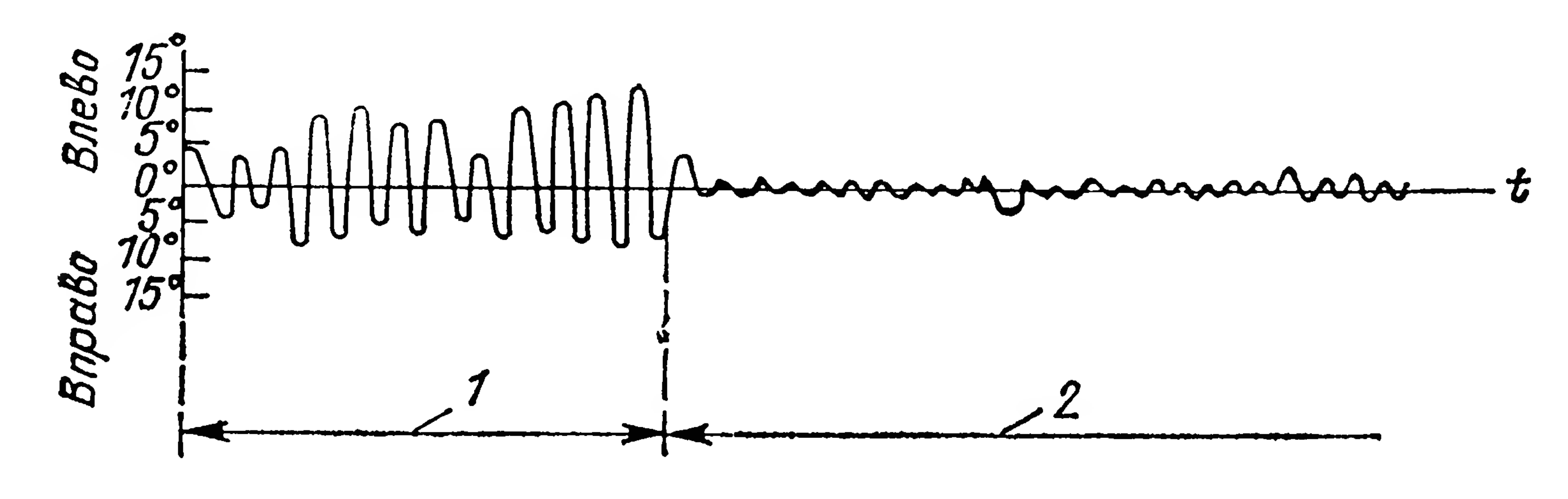
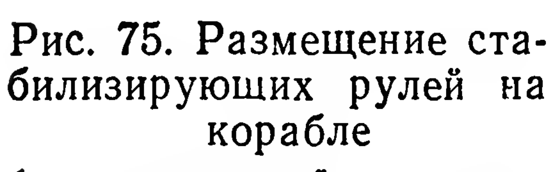
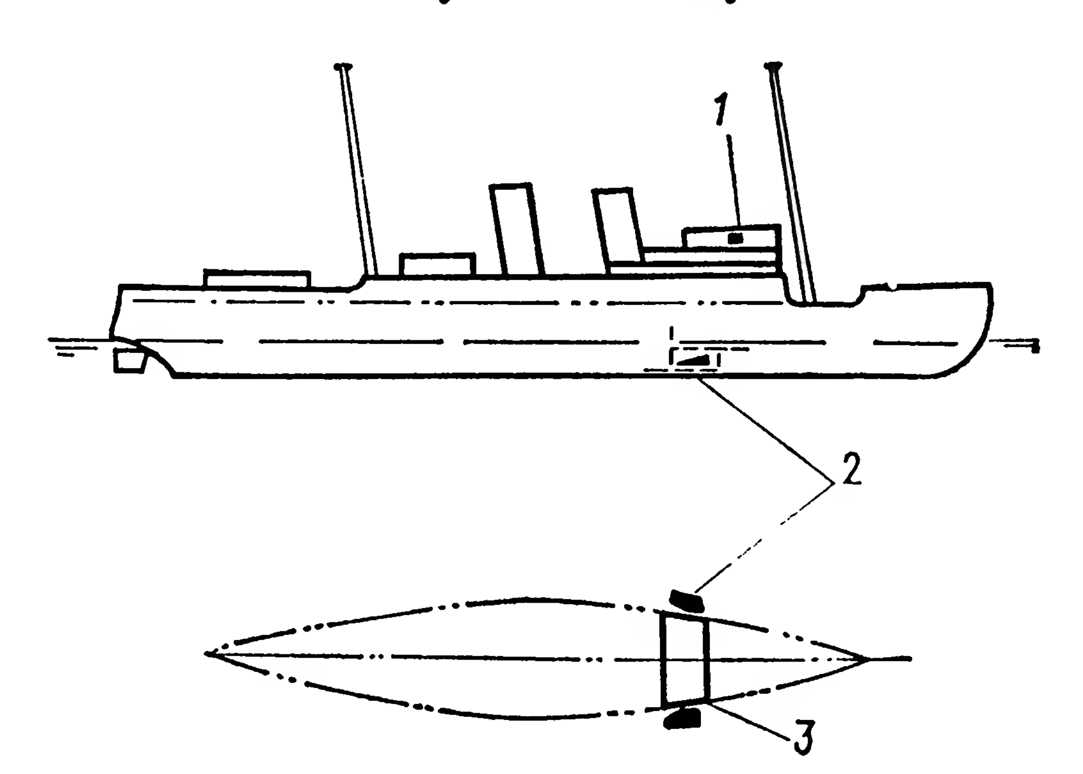



Рис. 74. Запись бортовой качки корабля
1 — при выключенном гиростабилизаторе; 2 — при включенном

Кроме перемещения вдоль осей $a_1a_1$ и $a_2a_2$ (см. рис. 72) боковые рули в выдвинутом положении могут поворачиваться вокруг этих же осей в пределах $\pm 20°$. Боковые рули расположены ниже ватерлинии, поэтому их повороты вокруг указанных осей могут создавать при движении корабля подъемную или погружающую силу.

При повороте бокового руля, когда его передняя кромка поднимается кверху, а задняя опускается вниз, возникает подъемная сила, тем большая, чем больше угол между плоскостью


Рис. 75. Размещение стабилизирующих рулей на корабле
1 — управляющий гироскоп; 2 — стабилизирующие рули; 3 — отсек стабилизирующих рулей




руля и горизонтом. При поворсте руля в противоположном направлении начинает действовать погружающая сила. Вращением рулей во взаимно противоположных направлениях создают пару сил относительно продольной оси корабля, которая и компенсирует возмущающий момент, порождаемый волнением на море.

Для своевременного поворота рулей на необходимые углы используется управляющий гироскоп, аналогичный контрольному в успокоителе качки (см. рис. 71). В тот момент, когда судно

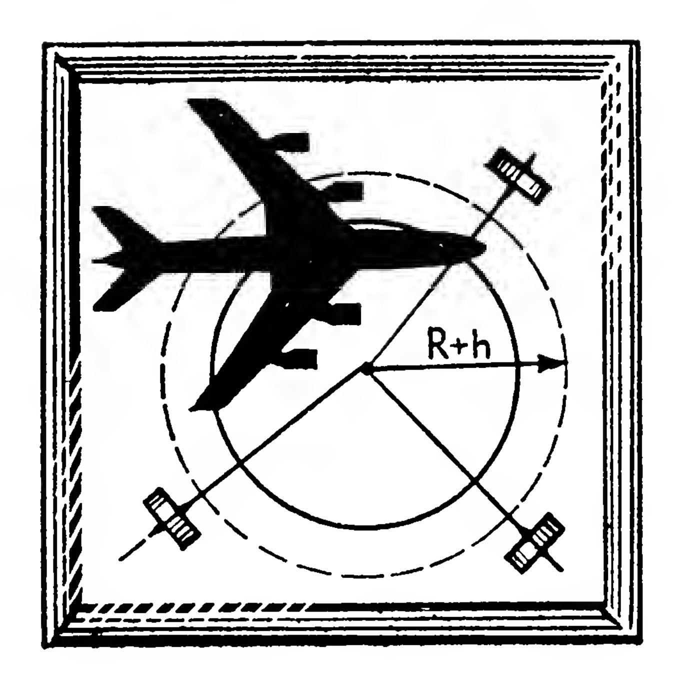
под воздействием волны приобретет даже самую незначительную скорость поворота вокруг продольной оси, гироскоп сразу же включит двигатели, которые и повернут управляющие рули на необходимые углы. Возникающий при этом момент будет противодействовать возмущающему, и крен судна на борт прекратится.

При изменении направления действия возмущающего момента гироскоп даст сигнал на реверсирование двигателей и управляющие рули будут повернуты в направлениях, противоположных первоначальным. Непрерывное реверсирование рулей управления и обеспечивает уменьшение качки корабля в четыре-пять раз, что наглядно показано на рис. 74. Такие успокоители качки установлены на наших советских теплоходах «Александр Пушкин» и «Михаил Лермонтов». Они обеспечивают достаточно спокойное движение судов даже при девятибалльном шторме.

Размеры управляющего гироскопа столь малы, что позволяют свободно размещать его на капитанском мостике. Размещение стабилизирующих рулей на судне иллюстрирует рис. 75. Эффективность описанного успокоителя будет тем выше, чем больше скорость движения корабля. Вот почему аналогичные системы гироскопических устройств нашли широкое применение при стабилизации судов на подводных крыльях.

* * *

Описанными примерами не ограничивается использование гироскопа в морском флоте. На современных кораблях нашли применение гироскопические тахометры, вертикали и приборы для определения азимутального направления. Особенно большое распространение получили они на судах, предназначенных для работы в узких фарватерах, когда даже незначительное отклонение от заданного курса может привести к нежелательным последствиям. О принципах устройства таких гироскопических приборов будет рассказано в следующей главе.






# ГИРОСКОП В АВИАЦИИ

## 23. Роль гироскопических приборов в самолетовождении

Во время полета самолета должны быть известны данные о географических координатах тех пунктов земной поверхности, над которыми он в данное мгновение пролетает. Лишь при этом условии можно совершить полет по заранее заданному маршруту. На заре авиации, когда летали только в ясную летную

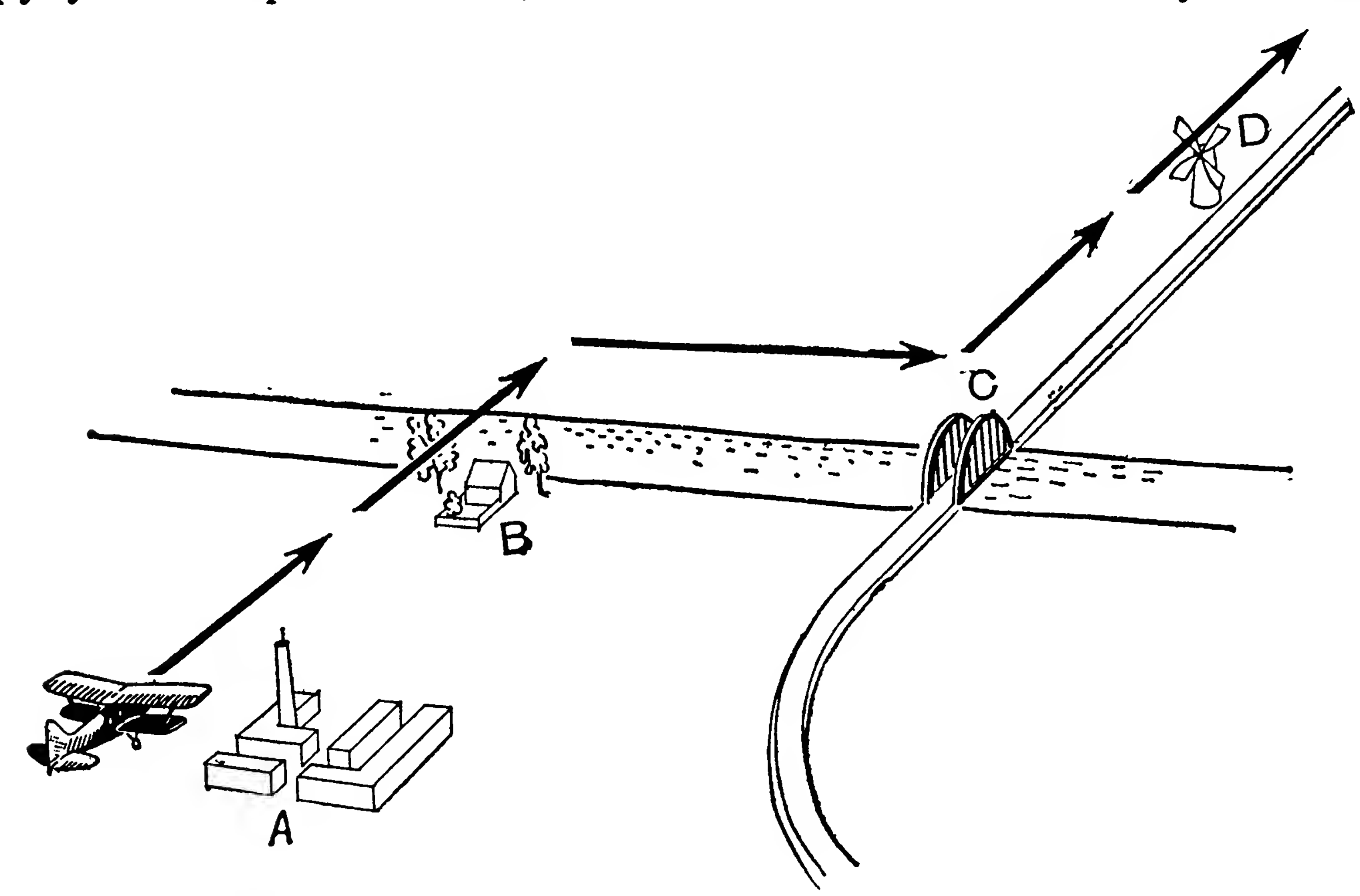



Рис. 76. Полет самолета по земным ориентирам

погоду, выполнение указанных условий не вызывало затруднений.

Если самолет, как показано на рис. 76, совершал полет по маршруту *ABCD*, то летчик выбирал вначале направление на поселок *A*, затем на хутор *B*, потом летел вдоль реки до моста *C* и далее придерживался железнодорожного полотна вплоть до пункта *D*. При хорошей видимости он легко ориентировался на

местности и, используя линию естественного горизонта, выдерживал горизонтальный полет.

С развитием авиации происходило увеличение дальности, скорости и высоты полета, вследствие этого уже нельзя было рассчитывать на выполнение его лишь в летную погоду. При больших дальностях беспосадочных полетов нельзя было надеется и на ясную погоду по всей трассе. На своем пути самолет мог попасть в облачность, туман, дождь или в другие неблагоприятные условия, при которых земная поверхность оказалась бы скрытой от глаз летчика.

Выполнение полетов при отсутствии видимости земной поверхности является характерной чертой современной авиации. Самолеты, перевозящие пассажиров и почту, должны совершать регулярные рейсы в любое время дня и ночи, при любой погоде, так как в противном случае может быть утеряно основное преимущество воздушного сообщения — скорость. Такие полеты проходят подчас в условиях отсутствия видимости как земли, так и небесных светил. В такой ситуации летчику приходится вести машину, как говорят, «вслепую».

Для выполнения «слепого» полета самолет должен быть оборудован приборами, указывающими направления меридиана и вертикали. В первые годы развития авиации для этой цели пытались использовать магнитную стрелку и маятник. Еще в 1804 г. при полете Я. Д. Захарова с научными целями на воздушном шаре в гондоле был установлен магнитный компас [41]. При постройке своего первого в мире самолета, испытания которого происходили в России в 1882—1889 гг., А. Ф. Можайский предусмотрел установку на нем специально сконструированного с помощью И. П. Колонга (1839—1902) магнитного компаса.

Русский самолет «Илья Муромец», первый полет которого состоялся в декабре 1913 г., имел два комплекта маятниковых креномеров и магнитных компасов: один для летчика, второй для штурмана. Однако ни магнитная стрелка, ни маятник не могли в условиях полета сохранить на качающемся корабле неизменным свое положение, совмещенное с полуденной линией и вертикалью соответственно. Силы трения в опорах подвесов вовлекали магнитную стрелку и маятник в движение, соответствующее колебаниям самолета или качке корабля.

Только применение гироскопа позволило создать навигационные приборы, удовлетворяющие требованиям авиации. Самолетостроителям пришлось идти своим путем в деле проектирования малогабаритных гироскопических приборов, успешно работающих в условиях больших перегрузок. Правда, в начале XX в. предпринимались попытки применения в авиации морского гирокомпаса. Дирижабль «Италия», совершивший в 1928 г. полет к Северному полюсу, был оборудован гирокомпасом. Однако эксперимент этот прошел неудачно.

Русская авиация часто была пионером в использовании гироскопических приборов для целей самолетовождения. Еще в

первую мировую войну русские военные самолеты имели гироскопические указатели горизонта, схожие по принципу работы с гироскопическим секстаном (см. рис. 14). Ротор такого гирогоризонта, изображенного на рис. 77, также приводился в действие сжатым воздухом, подаваемым внутрь прибора через патрубок *c* и отсасываемым оттуда через трубку *d*. Ротор гироскопа одним концом своей оси опирался на подпятник, неся на втором конце диск *a*, по положению которого относительно центра прозрачного колпака *b*, остающегося неподвижным относительно самолета, и выдерживался горизонтальный полет.

Русские летчики А. Н. Журавченко и Г. Н. Алехнович в 1917 г. совершили на самолете «Илья Муромец» «слепой» полет,

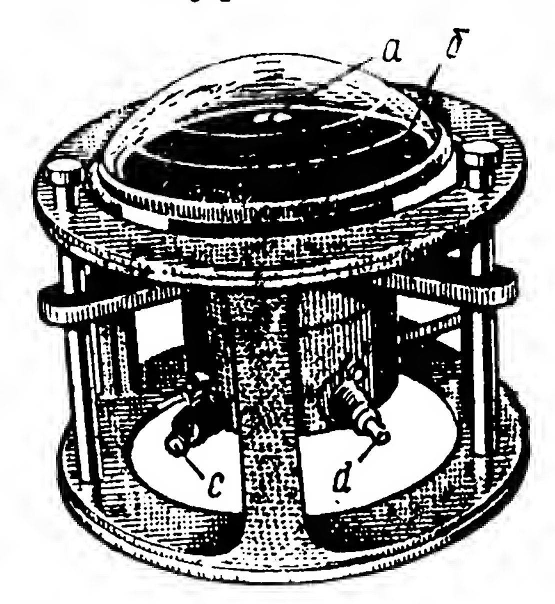




Рис. 77. Авиационный гирогоризонт 1914 г.

выдерживая заданный прямолинейный курс по гироскопическому прибору, указывающему угловую скорость вращения аэроплана вокруг вертикали. Принцип прибора был аналогичен принципу контрольного гироскопа *КГ* (см. рис. 71) успокоителя качки корабля. Этот прибор, разработанный П. П. Шиловским [39] специально для авиации, позволил провести самолет по заданному курсу при полном отсутствии видимости земных ориентиров.

Работы советских ученых А. Н. Крылова, Б. В. Булгакова, С. С. Тихменева, Г. О. Фридлендера, Г. А. Сломянского и многих других в содружестве с выдающимися советскими конструкторами и талантливыми инженерами обеспечили оснащение советской авиации высококачественными гироскопическими приборами. В двадцатых годах нашего столетия создаются авиационные гироскопические указатели курса и горизонта, ставшие обязательными навигационными приборами самолетов. В начале тридцатых годов советскими конструкторами был впервые в мире создан гиромагнитный компас, получивший широкое распространение не только в авиации всех стран мира, но и на других типах подвижных объектов.

## 24. Гироскопический тахометр

Одним из первых гироскопических приборов, нашедших применение в авиации, был измеритель угловой скорости,

показанный на рис. 78. Он состоял из ротора, вращающегося вокруг оси $AA$ в кольце $BK$. К последнему на продолжении оси $AA$ крепился стержень $D$, заканчивающийся шаровым наконечником. Между стержнем $D$ и кронштейном $L$, жестко закрепленным на корпусе $N$, устанавливались две цилиндрические пружины $a$ и $b$, которые ограничивали свободу вращения гироскопа вокруг оси $BB$. При повороте корпуса $N$ вокруг оси $CC$ гироскоп вращался с угловыми скоростями $\Omega$ и $\omega$. Стремясь совместить

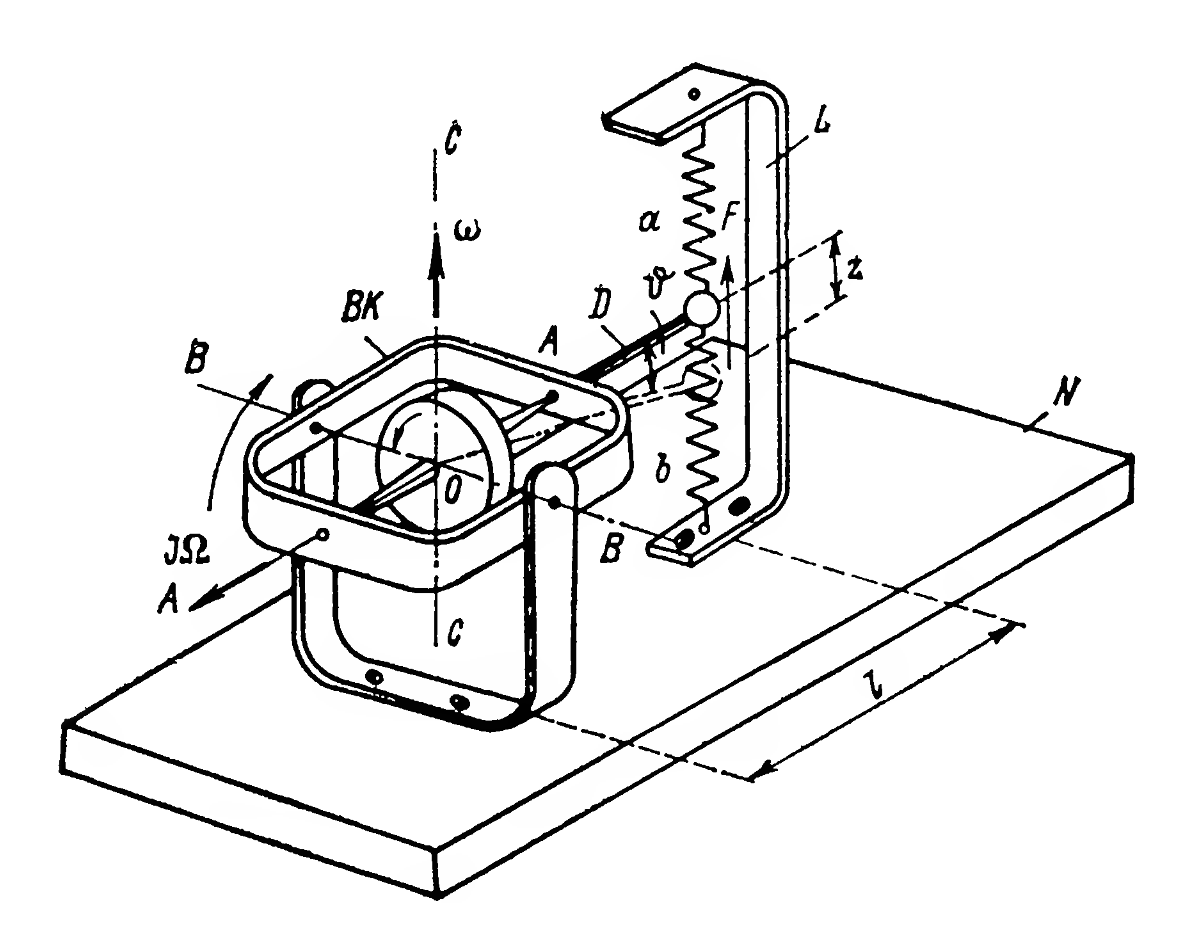



Рис. 78. Принципиальная схема гиротахометра

свою главную ось $AA$ с осью $CC$ вынужденного поворота, гироскоп поворачивался вокруг оси $BB$ вместе со стержнем $D$, деформируя пружины $a$ и $b$. Одна из них при этом растягивалась на величину $z$, вторая — на столько же сжималась.

При деформации пружин возникала сила упругости $F$, стремившаяся возвратить гироскоп в нейтральное положение. С увеличением угла $\vartheta$ поворота гироскопа вокруг оси $BB$ деформация $z$ пружин, а следовательно, и сила $F$ возрастали. При некотором значении $\vartheta$ сила $F$ создавала на плече $l$ момент $Fl$, уравновешивающий момент гироскопической реакции, определяемый по формуле (3). Наступало равенство моментов

$$Fl = I\Omega\omega,$$

и поворот гироскопа вокруг оси $BB$ прекращался.

Сила $F$ зависела от деформации $z$ пружин, возраставшей с увеличением угла $\vartheta$. Обозначая коэффициент этой пропорциональности через $k$, перепишем последнее равенство в виде

$$Fl = k\vartheta = I\Omega\omega.$$

Отсюда следует, что $\vartheta = \frac{I\Omega\omega}{k}$.

Угол $\vartheta$ в связи с постоянством в приборе кинетического момента $I\Omega$ и коэффициента $k$ является мерой угловой скорости $\omega$. Поэтому данный прибор позволял измерять угловую скорость его основания, отчего и был назван **гироскопическим тахометром**. С установкой гиротахометра на самолете была получена возможность определять направление и измерять величину угловой скорости его поворота вокруг той или иной оси. Так, совмещая ось $CC$ прибора (см. рис. 78) с вертикальной осью самолета, измеряли угловые скорости его отклонения от заданного направления полета.

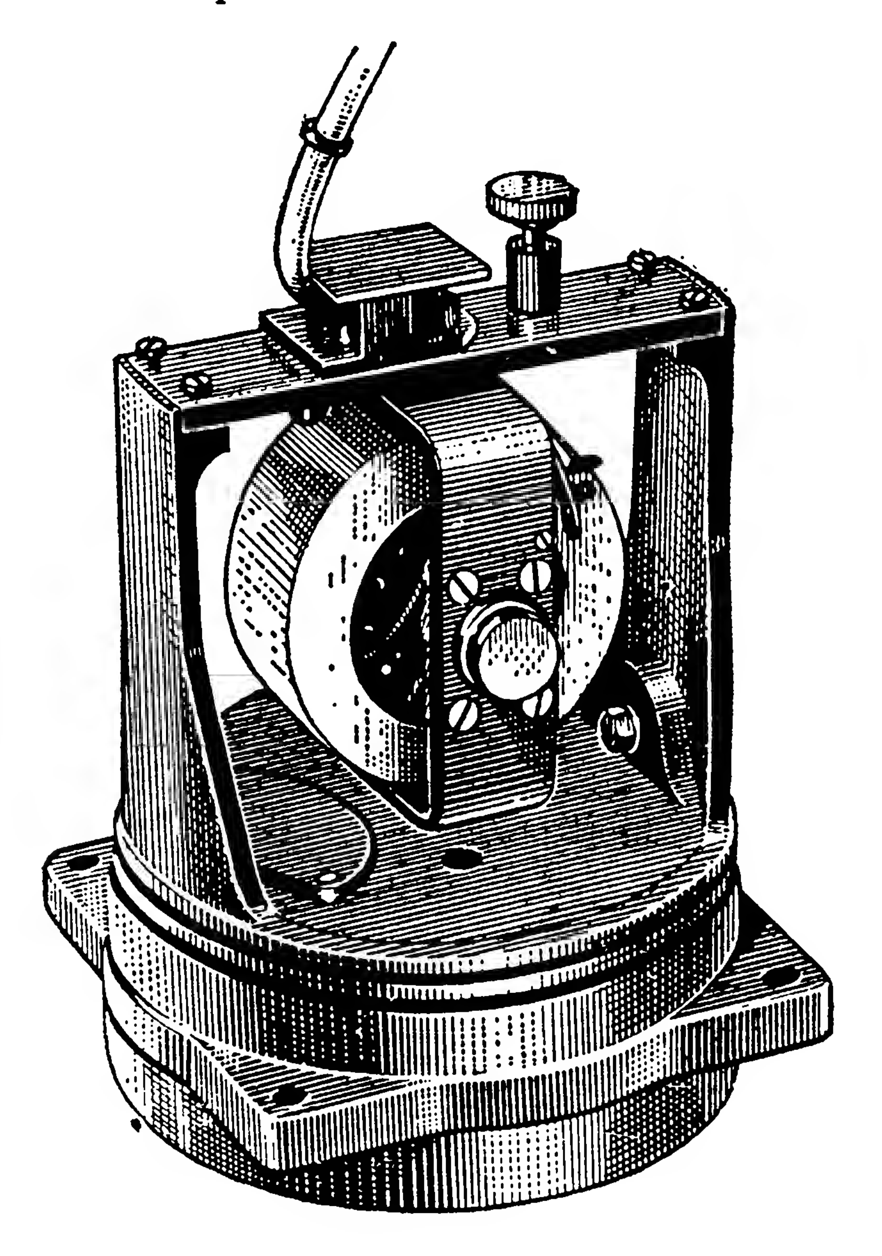


Рис. 79. Авиационный гиротахометр при снятой крышке

Гироскопический тахометр, внешний вид которого показан на рис. 79, является одним из основных приборов современной авиации. Его установка обязательна не только на самолетах, но и на каждом планере. Пользуясь гиротахометром, летчик котролирует правильность выполнения как прямолинейного полета, так и разворотов самолета. Им также пользуются и моряки для удерживания корабля на курсе при движении в узких местах, когда отклонение судна от заданного направления движения недопустимо.

## 25. Авиационный гироскоп направления

Несмотря на то, что гироскопический тахометр позволяет выдерживать прямолинейный полет и совершать правильные развороты самолета, пользоваться им одним при выполнении «слепого» полета недостаточно. Представим себе, что самолет совер-

шает полет, как показано на рис. 80, по заданному направлению $AB$. В результате какого-то возмущения самолет начал в точке $C$ отклоняться от заданного курса $AB$, поворачиваясь вокруг вертикали в направлении против часовой стрелки.

Это отклонение зафиксирует гиротахометр, стрелка которого отклонится от нулевой черты. Но летчик в момент нахождения самолета в точке $C$ мог наблюдать показания других приборов и обратил внимание на шкалу гиротахометра только в точке $D$, когда самолет уже отклонился от заданного курса $AB$ на угол $\Delta\alpha$.

Пилот, заметив по гиротахометру вращение самолета вокруг вертикали, сразу же примет меры для его прекращения, после чего вновь будет выдерживать прямолинейный полет, но уже по новому курсу $DE$, образующему с заданным направлением

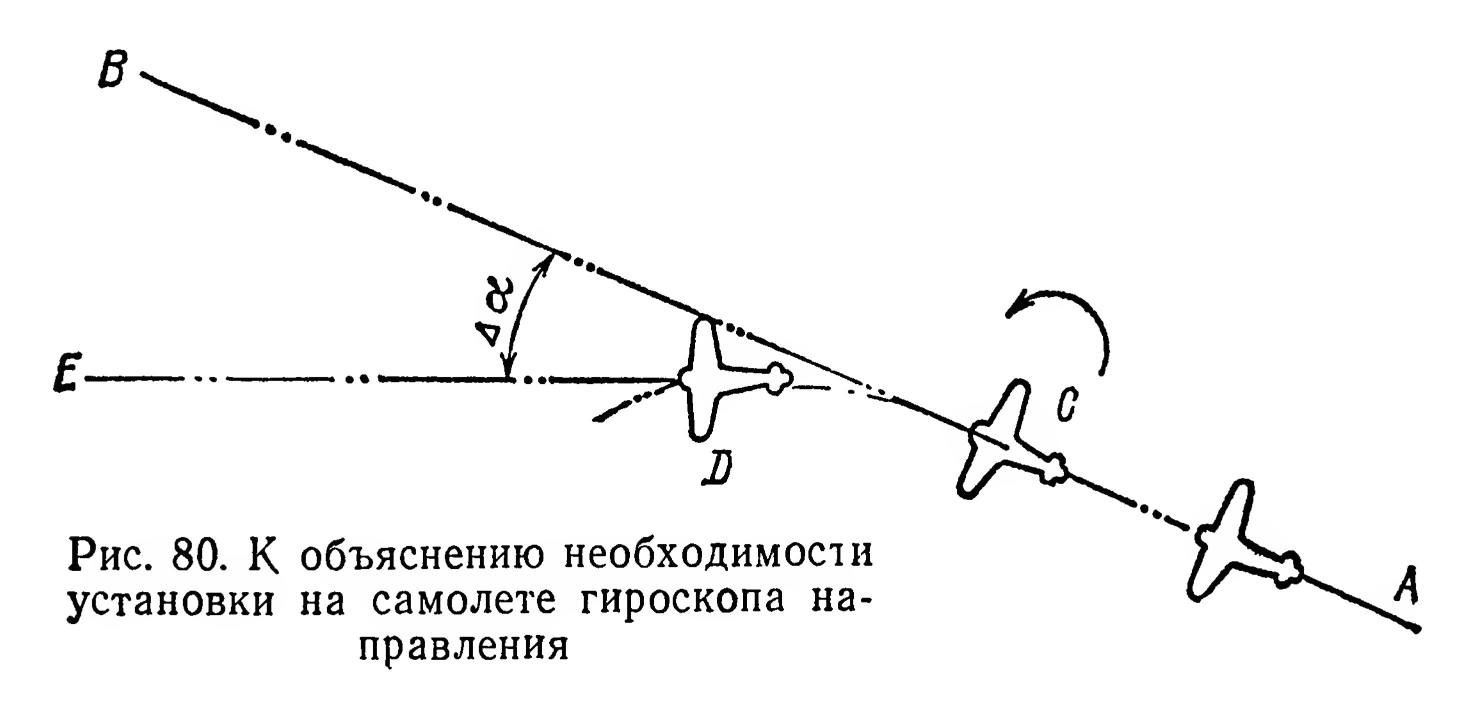



Рис. 80. К объяснению необходимости установки на самолете гироскопа направления

полета $AB$ угол $\Delta\alpha$. По показаниям гиротахометра летчик не может определить величину угла $\Delta\alpha$ и, следовательно, не устранит возникшую ошибку.

Для преодоления этого недостатка надо иметь еще один прибор, который позволял бы оценивать угол отклонения от заданного направления движения. Таким прибором является **авиационный гироскоп направления**, принципиальная схема которого приведена на рис. 81. Гироскоп описываемого прибора, обладая тремя степенями свободы, устанавливается в корпусе, который жестко крепится на самолете так, чтобы наружная ось $CC$ прибора была перпендикулярна плоскости $x_cO_cy_c$ крыльев. Ось $AA$ гироскопа предварительно совмещают с полуденной линией $NS$ (см. рис. 63) и направление полета оценивают величиной угла $\alpha_к$, называемого **углом компасного курса**. Этот угол образуется между осью $O_cx_c$ самолета и плоскостью $AOC$ гироскопа.

Для измерения угла $\alpha_к$ кольцо $HK$ гироскопа обладает диском $D$, или так называемой картушкой, с нанесенной на нем шкалой, которая разделена на 360°. Корпус прибора имеет индекс $L$, который остается неподвижным относительно плоскости $x_cO_cz_c$ самолета. Поэтому, если угол $\psi$ отклонения оси $AA$ гироскопа от плоскости $NO_1Z$ меридиана известен, то может быть

определен и истинный курс самолета, равный сумме двух углов:

$$\alpha = \psi + \alpha_к.$$

Однако такой метод измерения угла $\alpha$ на практике представляет определенные трудности. Свободный гироскоп сохраняет неизменным направление своей оси $AA$ в пространстве. Ранее отмечалось, что ось $AA$ гироскопа непрерывно отклоняется от плоскости $NO_1Z$ меридиана с угловой скоростью $\Omega_м$ (см. рис. 53),

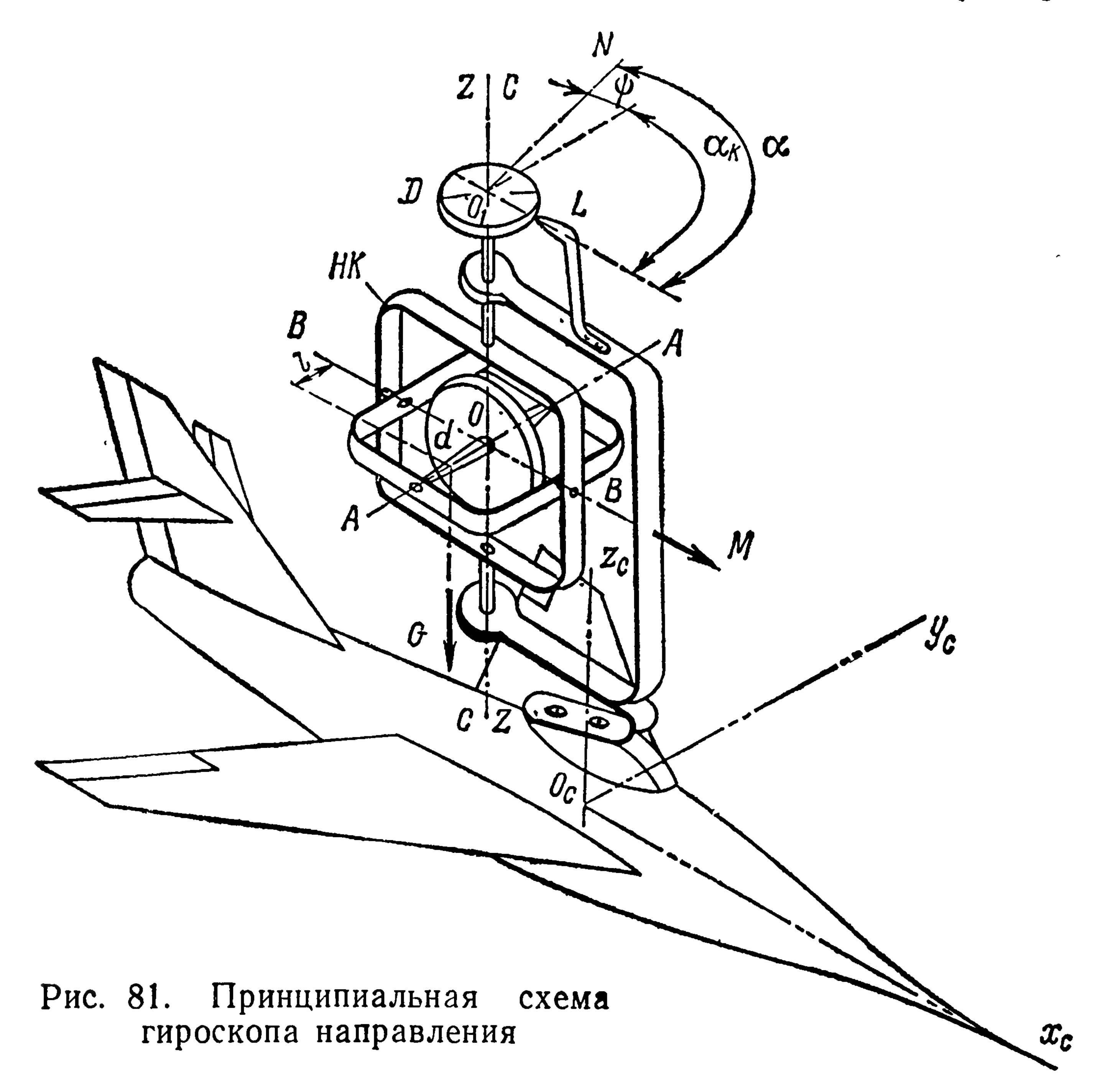



Рис. 81. Принципиальная схема гироскопа направления

Устраняя погрешность, гироскоп заставляют принудительно поворачиваться вокруг оси $ZZ$ (см. рис. 81) с такой же скоростью $\Omega_м$, с какой вращается в пространстве плоскость меридиана. С этой целью центр тяжести $d$ гироскопа смещают вдоль оси $AA$ на величину $l$. Тогда сила тяжести $G$ ротора создает относительно оси $BB$ момент $M = Gl$. Под его воздействием гироскоп получает прецессионное движение со скоростью $\frac{M}{I\Omega}$ вокруг вертикальной оси $ZZ$. Подобрав величину последней таким образом, чтобы соблюдалось равенство

$$\frac{M}{I\Omega} = \frac{Gl}{I\omega} = \Omega_м,$$

получим, что ось $AA$ гироскопа будет оставаться в данном пункте земной поверхности постоянно совмещенной с плоскостью $NO_1Z$ географического меридиана.

Представление о конструкции гироскопа направления дает рис. 82. Для наблюдения за его катушкой с лицевой стороны корпуса прибора выфрезеровано окно, по оси симметрии которого установлен индекс в виде тонкой проволочки. Гироскоп направления обычно снабжают еще и задающей шкалой, с помощью которой фиксируют заданный курс. Последняя шкала не связана с гироскопом, а соединена с корпусом прибора. Ее положение устанавливается вручную поворотом рукоятки, размещенной на лицевой стороне прибора. В некоторых моделях прибор снабжают маятниковым кренометром, хорошо видным на рисунке.

Гироскоп направления избавляет летчика от необходимости непрерывно наблюдать за гиротахометром. Даже в том случае

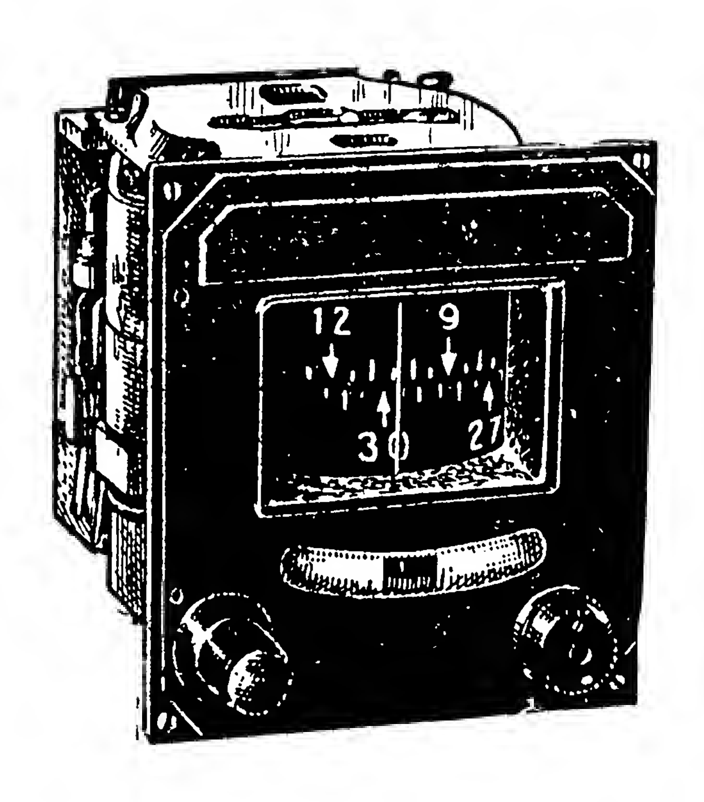



Рис. 82. Авиационный гироскоп направления со снятой крышкой

когда он пропустил момент начавшегося отклонения от направления $AB$ и заметил совершающийся поворот самолета лишь в точке $D$ (см. рис. 80), ошибка может быть устранена, поскольку гироскоп направления при полете вдоль прямой $DE$ будет фиксировать уже новый курс, отличающийся от заданного на угол $\Delta\alpha$. При этом достаточно, пользуясь гироскопом направления, развернуть самолет вокруг вертикали по часовой стрелке на угол $\Delta\alpha$ и полет будет продолжен по заданному направлению $AB$. Однако обеспечить в течение длительного времени совмещение оси $AA$ гироскопа с плоскостью $NOZ$ меридиана (см. рис. 81) весьма затруднительно. Силы трения в опорах подвеса, неточность балансировки, люфты в подшипниках и ряд других причин обусловливают возникновение моментов, вызывающих отклонение гироскопа от первоначально заданного направления.

Недостатком рассматриваемого прибора является также и то, что при отклонении оси $AA$ гироскопа от плоскости $NOZ$ меридиана она и после прекращения действия возмущающих моментов не возвратится в прежнее положение. Ось $AA$ будет стремиться остаться в положении, совмещенном с направлением, в котором она находилась в то мгновение, когда прекратилось действие на гироскоп моментов возмущающих сил. Это новое положение сохранится до тех пор, пока какие-либо возмущения

не вызовут дальнейших отклонений от установившегося направления в азимуте.

Воздействие возмущающих моментов происходит непрерывно, поэтому отклонение простейших гироскопов направления от заданного положения бывает довольно значительным, достигая примерно 5° за 15 мин. Таким прибором можно пользоваться в течение непродолжительного времени: при виражах самолета, в моменты преодоления зон облаков, туманностей, грозовых туч и т. п. Для повышения точности гироскопа направления применяются специальные устройства, с помощью которых достигается уменьшение моментов сил трения и люфтов в опорах подвеса, усиливают требования к точности изготовления и балансировки отдельных деталей и узлов гироскопа. Параллельно с указанным усложнением конструкции прибора велись поиски иных путей, гарантирующих постоянство совмещения главной оси гироскопа с плоскостью меридиана. Решение этой задачи впервые в мире было найдено советскими конструкторами, создавшими принципиально новый прибор, названный **гиромагнитным компасом**.

## 26. Авиационный гиромагнитный компас

Основным элементом этого прибора, схема которого приведена на рис. 83, является гироскоп, имеющий на геометрическом продолжении наружной оси *CC* независимо подвешенную магнитную стрелку *ns*. Последняя несет на себе контактный движок *r*. На диске, жестко соединенном с наружным кольцом *НК*, смонтированы две изолированные контактные ламели $b_1$ и $b_2$. При отклонении оси *AA* от плоскости $N_mOZ$ магнитного меридиана, с которой совмещена стрелка *ns*, движок *r* придет в соприкосновение с одной из ламелей $b_1$ или $b_2$. В результате через одну из двух обмоток электромагнита *ЭМ*, неподвижно укрепленного на кольце *НК*, пойдет электрический ток.

При включении в цепь электрического тока обмотки электромагнита *ЭМ* возникнет магнитный поток, который, воздействуя на якорек *Я*, укрепленный на оси внутреннего кольца *ВК*, создаст момент *M*. Последний будет стремиться повернуть гироскоп вокруг оси *BB*. Ранее было показано, что при действии на работающий гироскоп момента *M* возникает прецессия вокруг оси *CC*. Это движение будет происходить до тех пор, пока ось *AA* вновь не совместится с плоскостью $N_mOZ$ магнитного меридиана. В этот момент движок *r* выйдет из соприкосновения с контактной ламелью и прекратит питание электромагнита *ЭМ*.

Таков в общих чертах принцип работы гиромагнитного компаса, ось *AA* которого, корректируемая магнитной стрелкой, удерживается в плоскости магнитного меридиана. Однако при установке магнитной стрелки вблизи гироскопа возникают ошибки, порождаемые инерцией железной массы и сопротивлением

вращению токонесущих проводников. Для устранения этих недостатков магнитную стрелку в современных самолетах устанавливают в концах крыльев или в хвостовой части фюзеляжа, а

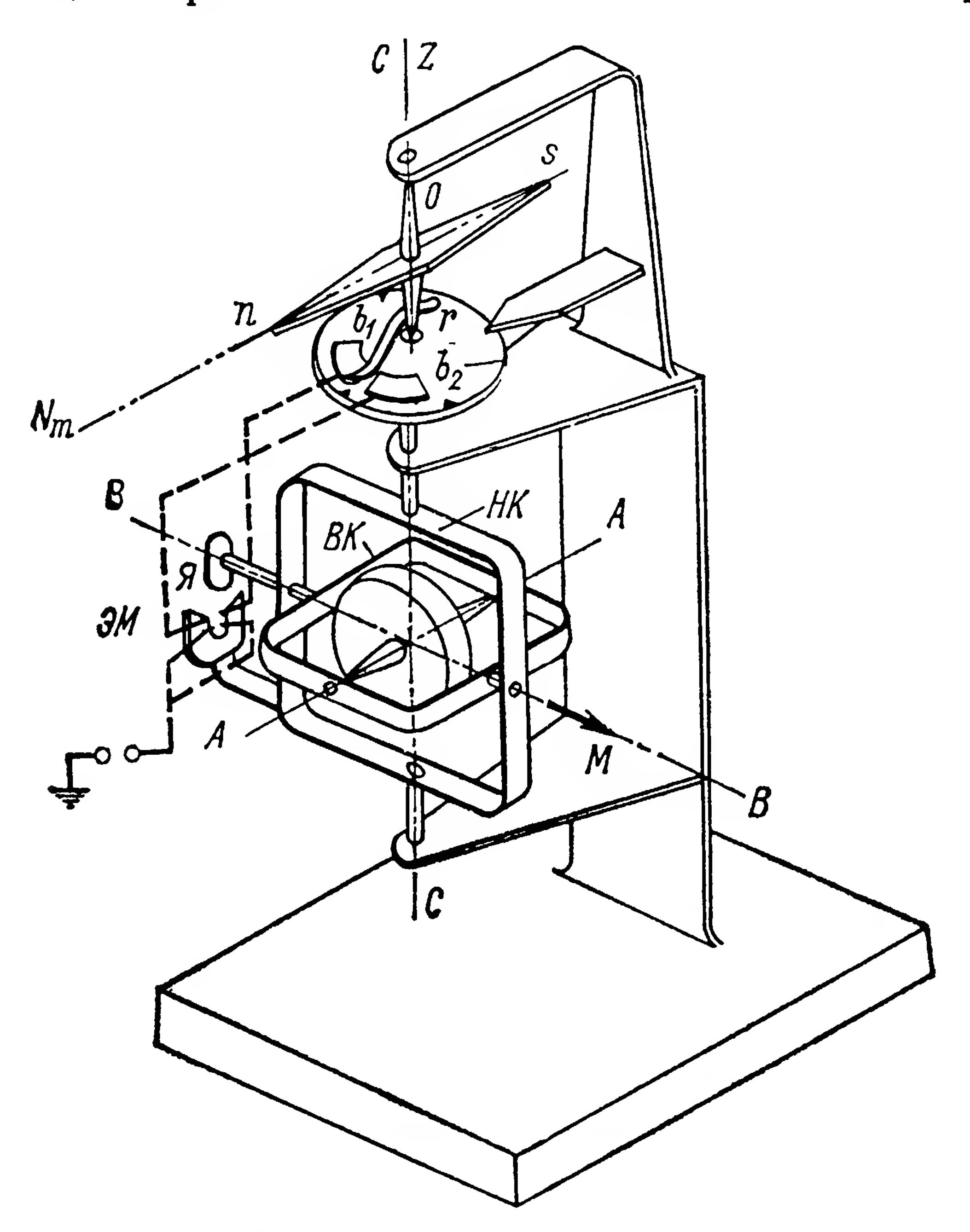



Рис. 83. Принципиальная схема гиромагнитного компаса

ее связь с гироскопом осуществляют с помощью синхронной электропередачи.

## 27. Авиационный гироскопический горизонт

Для осуществления «слепого» полета самолет должен быть оборудован приборами, указывающими его положение относительно плоскостей меридиана и горизонта. Первую функцию выполняют гироскоп направления и гиромагнитный компас. Для фиксирования же плоскости горизонта необходим гироскоп, главная ось которого сохраняла бы вертикальное положение. Естественно, что свободный гироскоп не может быть пригоден для решения этой задачи. Если бы полет совершался по показаниям свободного гироскопа, главная ось которого, как показано на рис. 84, на старте была бы совмещена с радиусом Земли $O_3Z$, то движение самолета оставалось бы прямолинейным относительно неподвижных звезд, а не относительно земной поверхности. Поэтому под прямолинейным горизонтальным полетом принято понимать перемещение самолета на по-

стоянной высоте $h$ над земной поверхностью по дуге окружности постоянного радиуса, равного сумме земного радиуса $R$ и высоты полета $h$. Нетрудно заметить, что главная ось гироскопа, предназначенного для выдерживания горизонтального полета, должна быть постоянно совмещена с истинной вертикалью $O_3Z$, которая, как известно, изменяет свое положение в пространстве. Требуемое условие может быть выполнено лишь при наличии в гироскопической системе сил, которые создавали бы моменты, обеспечивающие совмещение главной оси гироскопа с вертикалью $O_3Z$.

В авиационном горизонте 1914 г. (см. рис. 77) в качестве такой силы использовался вес ротора, подвес которого в корпусе прибора обладал свойствами маятника (см. рис. 14). Однако

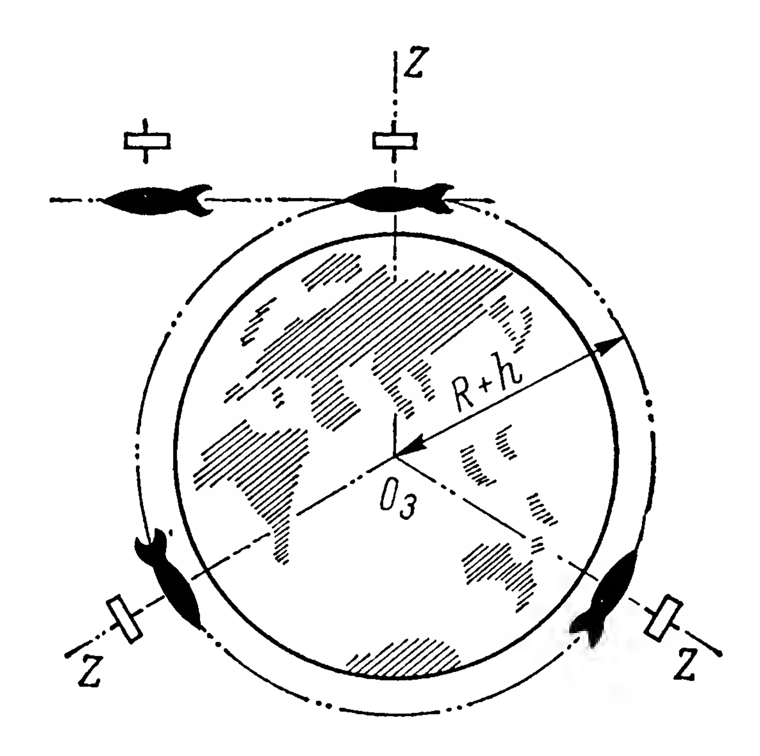



Рис. 84. Схема прямолинейного полета самолета в пространстве и у земной поверхности

маятниковая гировертикаль не получила распространения в авиации. Объясняется это тем, что для удержания главной оси в вертикальном положении необходим значительный маятниковый момент, преодолевающий момент сил трения, возникающий в опорах подвеса гироскопа. С этой целью приходится увеличивать массу ротора, что и ведет к возрастанию габаритов прибора. Маятниковая вертикаль получила практическое применение лишь в морском флоте. В авиации же для сохранения вертикали используется коррекция главной оси гироскопа по показаниям физических маятников. Здесь наблюдается аналогия с коррекцией гироскопа по магнитной стрелке в гиромагнитном компасе.

Рассмотрим гироскоп с тремя степенями свободы, показанный на рис. 85, центр тяжести которого совмещен с точкой $O$ его подвеса. На его внутреннем кольце $BK$ в специальной оправе $L$ смонтированы два маятника, один из которых фиксирует повороты гироскопа вокруг внутренней $BB$, второй — вокруг наружной $CC$ осей подвеса.

При отклонении оси $AA$ гироскопа от вертикали $OZ$, которое произойдет лишь при повороте гироскопа вокруг одной из осей $BB$ или $CC$, маятники, стремясь сохранить вертикальное положение, переместятся относительно гироскопа и замкнут соответ-

ствующие контактные ламели своей пары. На двигатели $ДМ_В$ и $ДМ_С$, называемые датчиками моментов, будет подан электрический ток. При этом маятник, фиксирующий углы поворота гироскопа вокруг оси $ВВ$, будет управлять датчиком момента $ДМ_С$, создающим корректирующий момент относительно оси $СС$. Другой маятник, фиксирующий углы поворота вокруг оси $СС$, управляет датчиком момента $ДМ_В$. Воздействие на гироскоп внешних

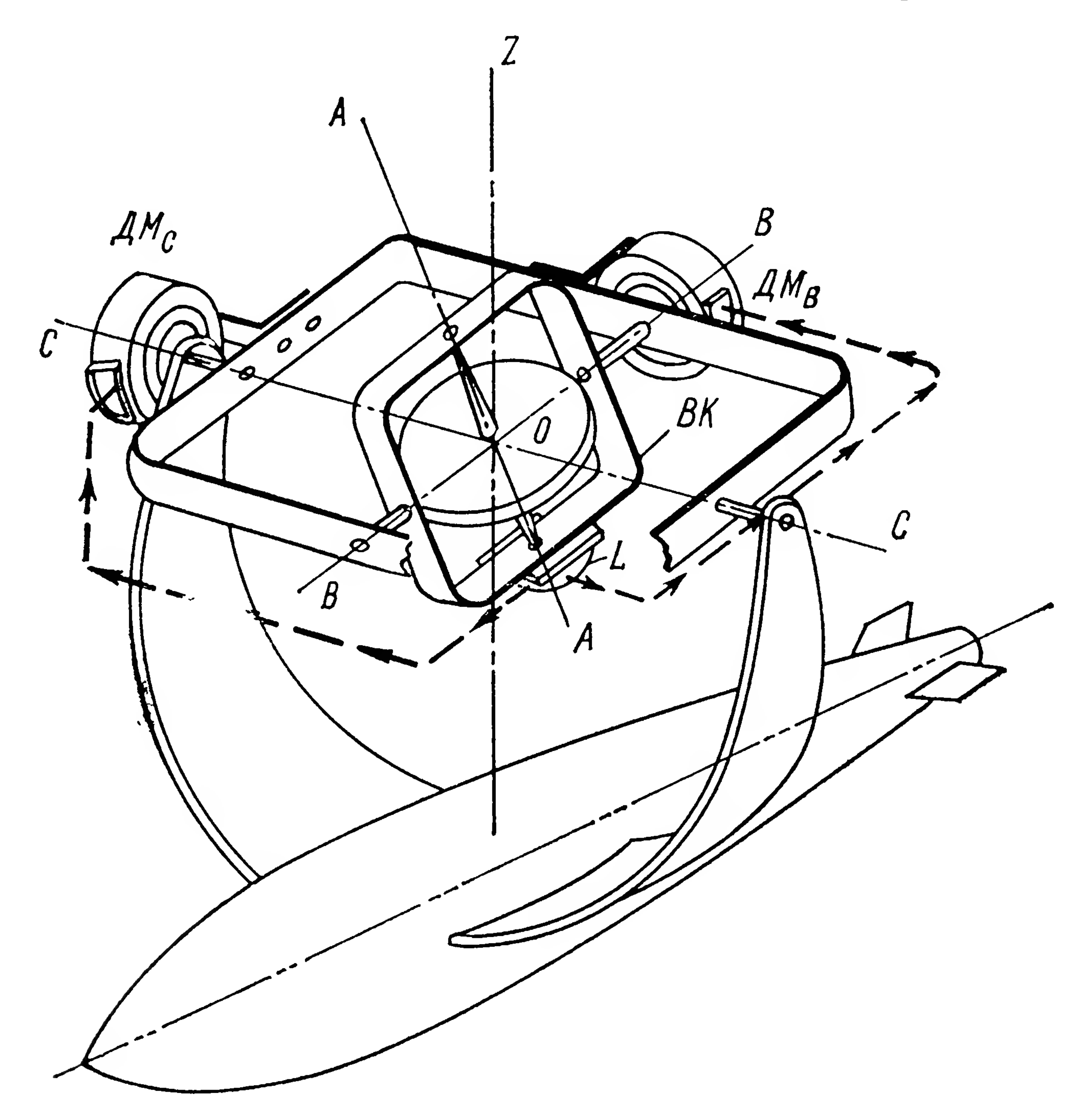



Рис. 85. Принцип устройства гирогоризонта

моментов, создаваемых двигателями $ДМ_В$ и $ДМ_С$, и приводит его главную ось $АА$ к совмещению с вертикалью $OZ$. Описанный гироскопический прибор получил название гирогоризонта.

## 28. Автоматический штурман

С ростом скоростей, а также высоты и дальности беспосадочных полетов усложнилась работа по определению местоположения летящего самолета, который на протяжении большей части пути совершает полет при отсутствии видимости земных ориентиров. Это вызвало потребность в приборах, автоматически регистрирующих пройденный самолетом путь. Прообразом таких приборов явился самопишущий магнитный компас, разработанный М. В. Ломоносовым еще в 1759 г. Но толь-

ко использование гироскопа позволило создать самописец пройденного пути, названный **автоматическим штурманом**.

Рассмотрим изображенный на рис. 86 планшет *П* с закрепленной на нем картой предстоящего маршрута. Над последней размещены две взаимно перпендикулярные кулисы $К_м$ и $К_п$, в прорезях которых установлен соединяющий их ползунок *Р*. Последний несет карандаш, соприкасающийся острием с плоскостью карты. Каждая кулиса заканчивается гайкой, связывающей их с ходовыми винтами $ХВ_м$ и $ХВ_п$, приводимыми во вращение электродвигателями. Электродвигатель $ЭД_м$ вращает

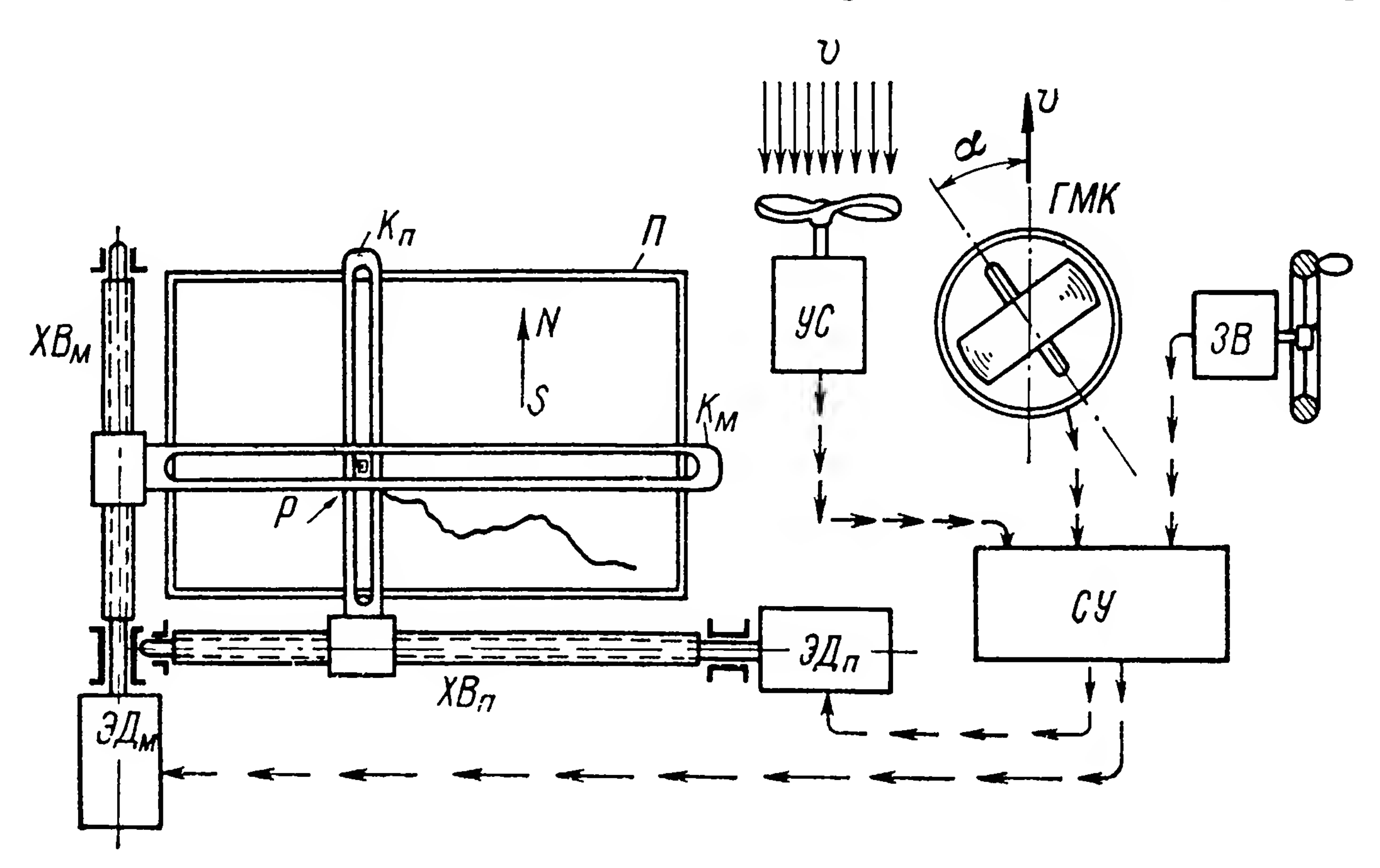



Рис. 86. Принципиальная схема автоштурмана

ходовой винт $ХВ_м$, перемещающий кулису $К_м$, заставляя ползунок *Р* двигаться вдоль меридиана карты. При вращении двигателя $ЭД_п$ ползунок *Р* движется вдоль параллели. В результате карандаш вычерчивает на карте след перемещения ползунка. Для того чтобы последний соответствовал линии проходимого самолетом пути, перемещение ползунка должно происходить со скоростью, пропорциональной скорости полета. С этой целью в автоштурмане предусмотрен указатель скорости *УС*, показания которого передаются в счетно-решающее устройство *СУ*. Обратимся к рис. 87. Направление воздушной скорости $v$ самолета относительно плоскости меридиана *NS* может занимать любое положение. Для регистрации на карте пути самолета его воздушную скорость $v$ раскладывают на две составляющие: $v_м$ — вдоль меридиана и $v_п$ — вдоль параллели (рис. 87, *а*). Поскольку значения составляющих зависят от угла курса $\alpha$, то в счетно-решающее устройство *СУ* с гиромагнитного компаса *ГМК* вводится еще и значение угла $\alpha$ (см. рис. 86).

На скорость самолета относительно земной поверхности большое влияние оказывают ветры. В общем случае скорость ветра $v_в$ порождает боковой снос самолета от заданного направления полета. В этом случае путевая скорость $v_{пут}$ определяется гео-

метрической суммой двух скоростей $v$ и $v_в$ (рис. 87, *б*). Проекции путевой скорости $v_{пут}$ на направления меридиана $v_{пут.м}$ и

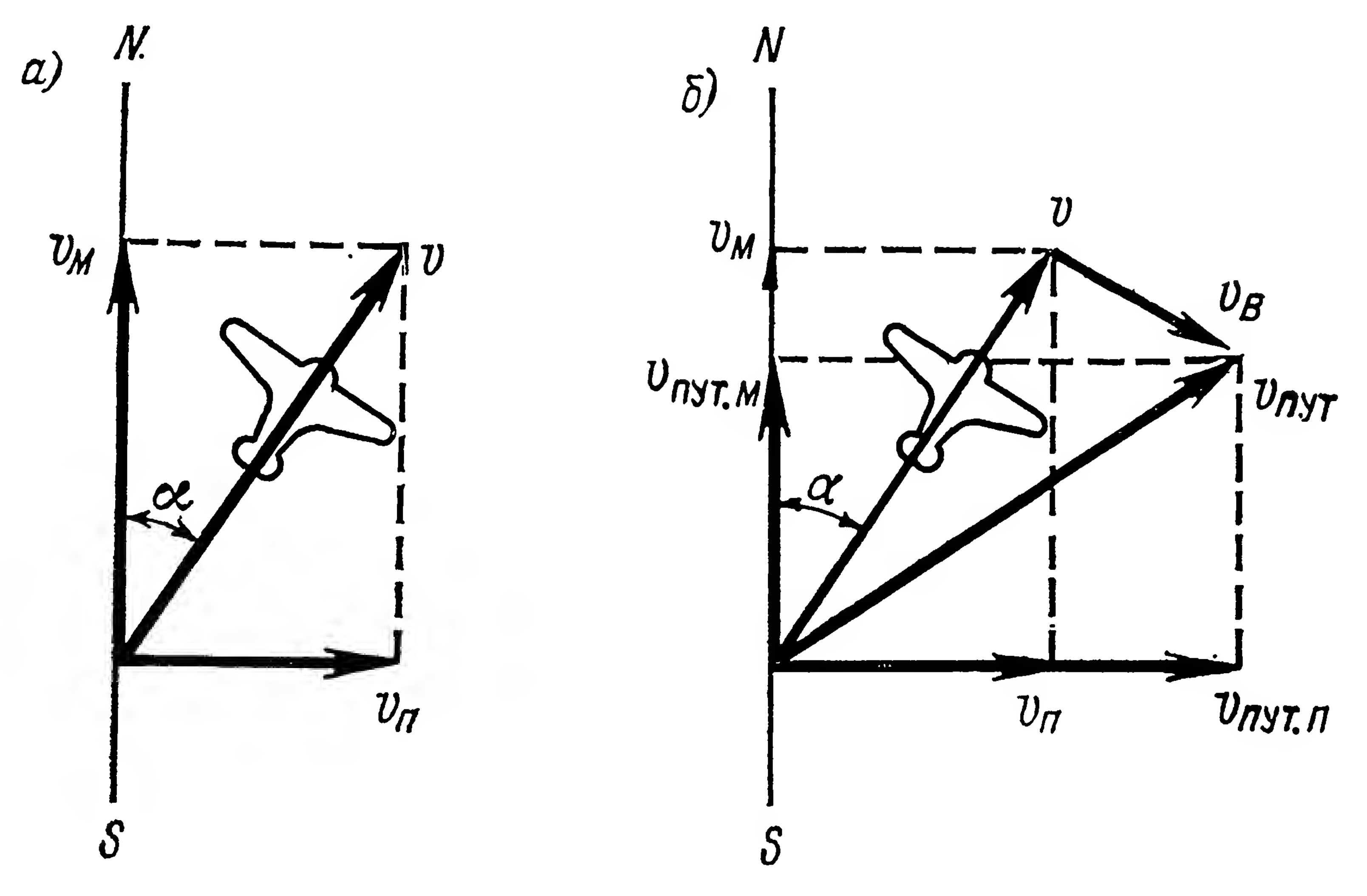



Рис. 87. К объяснению воздействия силы ветра на снос самолета с заданного курса: *а* — составляющие скоростей полета в отсутствие ветра; *б* — направление полета при действии ветра

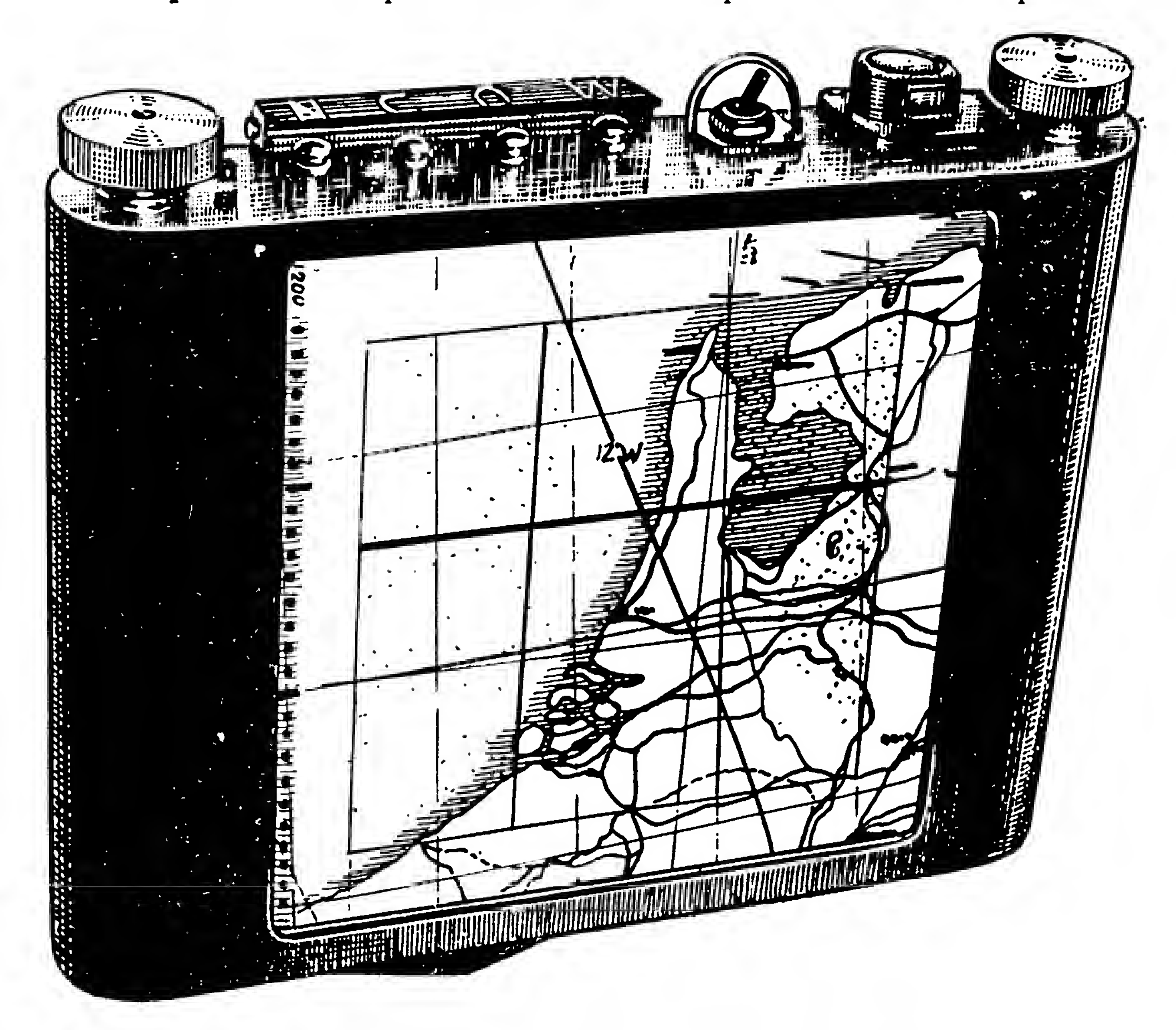


Рис. 88. Внешний вид планшета автоштурмана

параллели $v_{пут.п}$ будут отличаться от проекций $v_м$ и $v_п$ на те же направления воздушной скорости $v$. При большой протяженности маршрута и сильном ветре ошибки записи пройденного

пути из-за сноса самолета могут достигать больших значений. Поэтому в автоштурманах предусматривается задатчик скорости и направления ветра *ЗВ* (см. рис. 86), пользуясь которым штурман вручную вводит поправку в счетно-решающее устройство *СУ*. После обработки сигналов, поступающих с указателя скорости *УС*, гиромагнитного компаса *ГМК* и задатчика ветра *ЗВ*, из счетно-решающего устройства *СУ* на электродвигатели $ЭД_м$ и $ЭД_п$ подается напряжение, вызывающее перемещение кулис $К_м$ и $К_п$ в соответствии со значениями путевых скоростей $v_{пут. м}$ и $v_{пут. п}$. Вследствие указанных перемещений кулис карандаш ползуна *Р* вычертит на карте планшета *П*, внешний вид которого показан на рис. 88, кривую, соответствующую пройденному самолетом пути.

## 29. Гироскопический автопилот

Применение гироскопа в авиации позволило удерживать самолет в заданном направлении, облегчая при этом работу пилота, поскольку выдерживание прямолинейного полета сопряжено для летчика с преодолением значительных трудностей. Воздушные течения, случайные порывы ветра, различия температуры и плотности отдельных слоев воздуха, неравномерность развиваемой двигателями тяги, изменения положения центра массы самолета, вызываемые расходом горючего, и ряд других причин порождают возмущающие силы, стремящиеся отклонить самолет от заданного направления полета. Изменяя положение рулей управления относительно корпуса самолета, летчик восстанавливает требуемое положение машины. Но, поскольку внешние возмущения действуют на самолет практически непрерывно, летчику приходится все время придавать рулям управления соответствующие положения. Такая монотонная работа быстро утомляет пилота. Вот почему почти с первого дня зарождения авиации ученые и изобретатели искали возможность автоматизировать управление полетом. Еще в 1898 г. наш великий соотечественник основоположник науки о ракетоплавании К. Э. Циолковский разработал схему автоматического устройства для удерживания, или стабилизации, горизонтального положения цельнометаллического дирижабля в продольной плоскости его движения.

Было предложено много вариантов устройств, облегчающих работу летчика, но только применение гироскопа позволило обеспечить автоматическое управление самолетом. Устройства, названные а в т о п и л о т а м и, позволили управлять взлетом и посадкой, выдерживать заданный курс, выполнять развороты и различные эволюции [30]. Основными приборами автопилота, схема которого представлена на рис. 89, являются гироскоп направления *ГН* и гирогоризонт *ГГ*. По наружной оси гироскопа и по обеим осям гирогоризонта установлены движки потенцио-

метров *П*, обмотки которых укреплены на корпусах приборов. Поэтому при поворотах самолета вместе с ним движутся и обмотки потенциометров, в то время как их движки, жестко закрепленные на гироскопах, сохраняют неизменное положение.

При отклонении самолета от заданного направления полета движки перемещаются по обмоткам потенциометров и снимаемые с них сигналы направляются сначала в усилители *УС*, а затем на рулевые машинки *РМ*. В момент поступления управляющего сигнала на рулевую машинку начинает вращаться ее ведущий шкив, вызывающий посредством тросов изменение положения

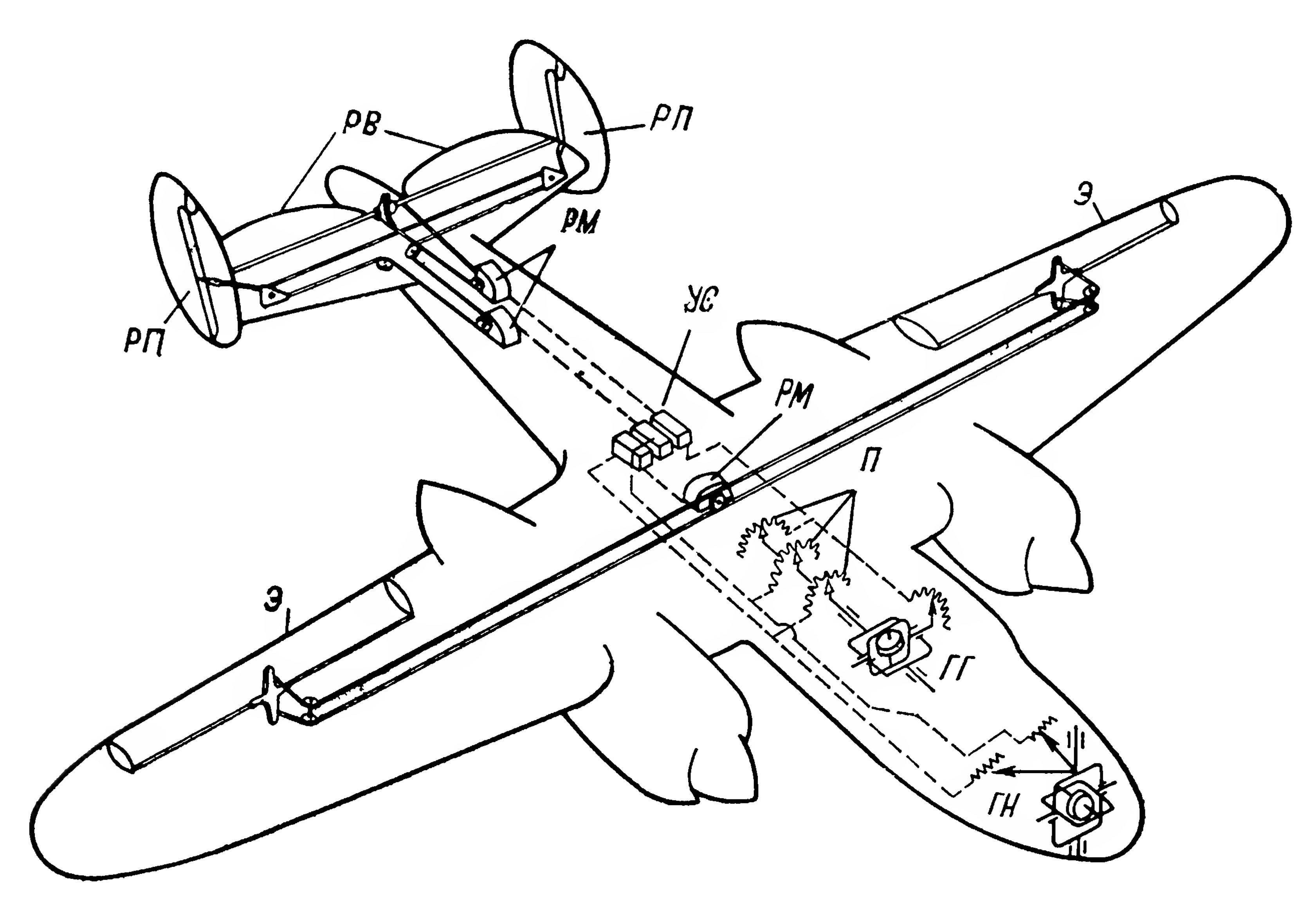



Рис. 89. Принципиальная схема автопилота

соответствующих рулей управления, возвращающих самолет на заданное направление полета. В это время происходит обратное перемещение обмоток потенциометров *П* относительно движков. Снимаемый с потенциометров сигнал уменьшается, снижая постепенно скорость возвратного поворота рулей управления. В момент возвращения самолета на заданное направление движки совместятся с нулевыми точками обмоток потенциометров и снимаемый сигнал станет равным нулю. Прямолинейный полет будет продолжаться до тех пор, пока новое возмущение не вызовет отклонение самолета от заданного направления. Вновь совершится цикл работы автопилота, возвращающий самолет в исходное положение.

Для разворота самолета необходим совместный, или координированный, поворот рулей. Поэтому сигналы, снимаемые с потенциометров *П* гироскопов *ГН* и *ГГ*, подаются в определенном соотношении одновременно на две рулевых машинки, одна

из которых управляет элеронами *Э*, а другая — рулями поворота *РП*. Сигнал, снимаемый с внутренней оси гирогоризонта *ГГ*, значение которого пропорционально углу поворота самолета вокруг продольной оси, подается на рулевую машинку. Последняя управляет рулями высоты *РВ*.

## 30. Гироскоп, управляющий вертолетом

Вертолет, являющийся разновидностью летательных аппаратов, получил в авиации широкое распространение. Его специфическим отличием, как явствует из рис. 90, является отсутствие крыльев, функцию которых выполняет несущий винт. При вращении последнего вокруг оси $OD$ возникает аэродинамическая

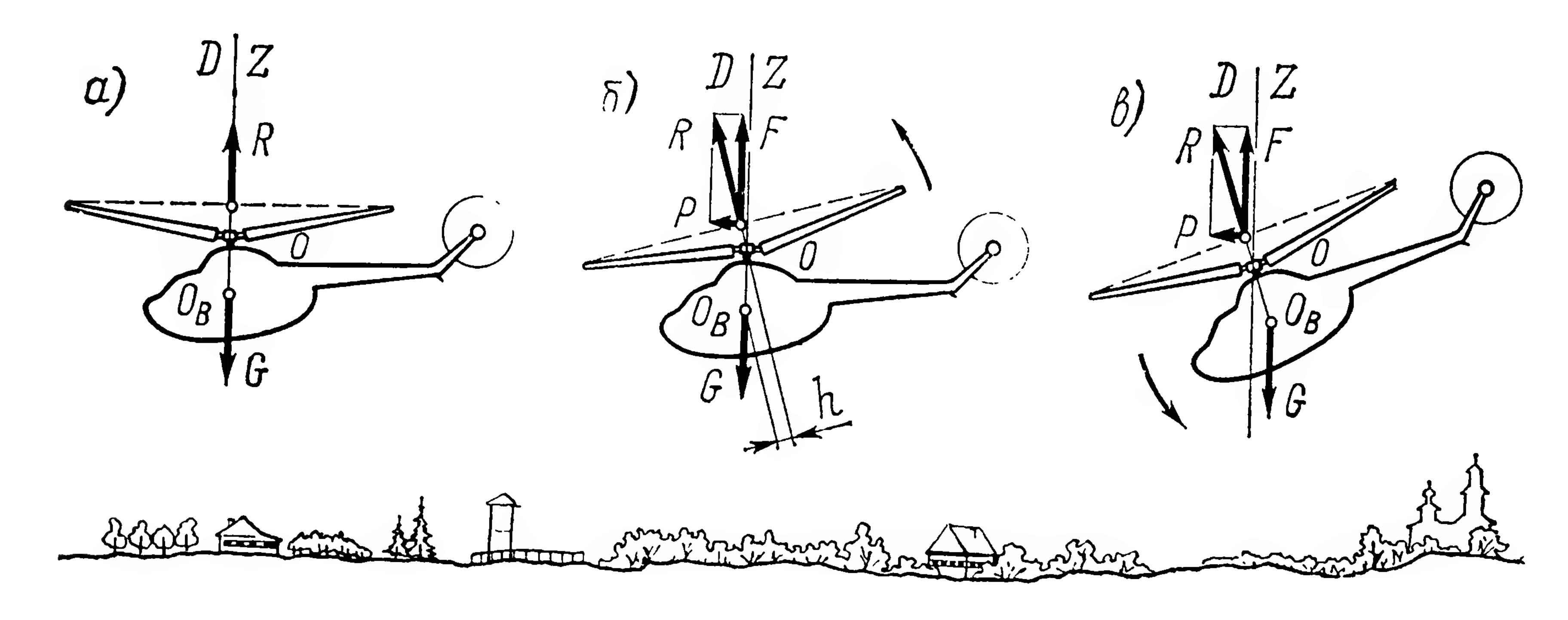



Рис. 90. Маневры вертолета

сила $R$, обеспечивающая перемещение вертолета в воздухе. При вертикальной ориентации как оси $OD$, так и вектора силы $R$ движение вертолета происходит строго вверх по линии $OZ$ (рис. 90, *а*). При $R > G$ летательный аппарат будет подниматься, а при $R = G$ он сохраняет неподвижное положение над земной поверхностью, или, как говорят, «зависает» над ней. И, наконец, при $R < G$ вертолет снижается. При отклонении оси $OD$ вращения винта от вертикали $OZ$ (рис. 90, *б*) сила $R$ может быть разложена на две составляющие $F$ и $P$. Первая из них $F$ обеспечивает необходимое перемещение вертолета по вертикали, а вторая $P$ — его горизонтальное движение. Существенно отметить, что вектор силы $R$ в последнем случае будет проходить уже на удалении $h$ от центра массы $O_B$ вертолета, создавая относительно последнего момент $Rh$, направленный против часовой стрелки. Под влиянием этого момента нос вертолета начнет опускаться вниз до тех пор, пока его центр массы $O_B$ не совместится с направлением вектора аэродинамической силы $R$ (рис. 90, *в*). Изменение положения несущего винта осуществляется с помощью автомата перекоса, позволяющего, как пока-

зано на рис. 91, рассогласовывать оси $OD$ винта и приводного вала $E$, который сохраняет перпендикулярность фюзеляжу. Воздействуя на рычаги управления автоматом перекоса, летчик придает плоскости $xOy$ лопастей винта необходимый угол относительно оси $OD$ и обеспечивает тем самым требуемый режим полета. Изменения положения плоскости $xOy$ относительно оси $OD$ могут возникнуть и вопреки желанию летчика, вследствие порывов ветра и других возмущений. Раскачивая корпус вертолета, а вместе с ним и вал $E$, последние будут стремиться изме-

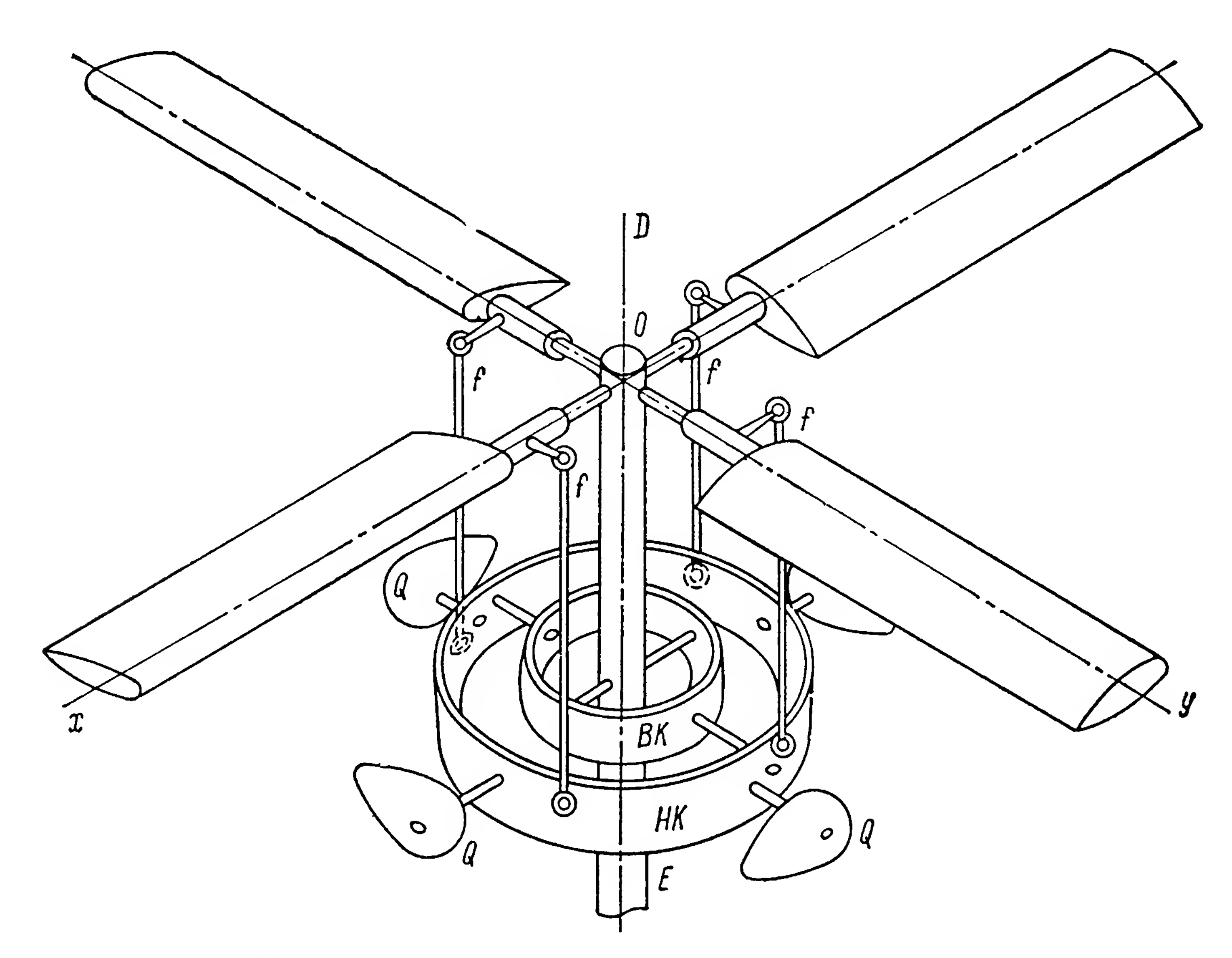



Рис. 91. Гироскоп, управляющий вертолетом

нить положение плоскости $xOy$ лопастей винта относительно горизонта, что вызовет отклонение от заданного режима полета. Для предотвращения такой ситуации используется управляющий гироскоп [10], представляющий собой кольцо $HK$, осевой момент инерции которого увеличен закрепленными на нем массами $Q$.

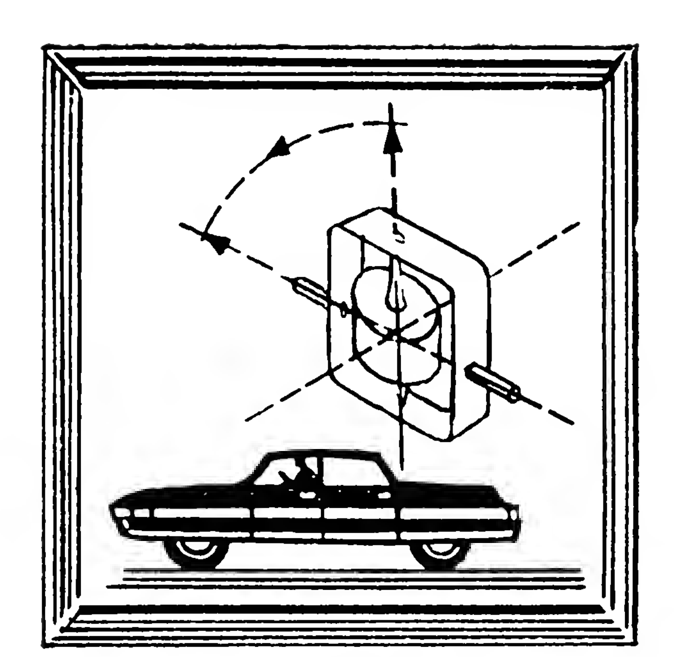
Кольцо $HK$ с помощью карданова кольца $BK$ шарнирно закреплено на приводном валу $E$. При его вращении вокруг оси $OD$ в движение вовлекаются как лопасти винта, так и кольцо $HK$. Приобретая большой кинетический момент, кольцо $HK$ становится гироскопом. При наклоне оси $OD$ вала $E$ к вертикали оно сохранит свое положение в пространстве неизменным. Оба кольца $HK$ и $BK$ получат в этом случае перекосы относительно вала $E$ и вызовут через шарнирные тяги $f$ повороты лопастей несущего винта вокруг осей $Ox$ и $Oy$ на соответствующие углы как по величине, так и по направлению. Возникающий при этом



Рис. 92. Перед запуском модели вертолета с гироскопом

аэродинамический момент и восстановит нарушенное положение летательного аппарата относительно плоскости горизонта.

Аналогичную систему гироскопической стабилизации еще в 1964 г. установил на свою модель вертолета, показанную на рис. 92, В. С. Слепков [44]. Данная модель благодаря стабилизации заданного направления движения совершала более длительные перелеты по установленному маршруту. Указанное преимущество и принесло автору управляемой гироскопом модели большой успех на всесоюзных соревнованиях в период 1970—1980 гг.





# VI

# ГИРОСКОП НА ТРАНСПОРТЕ

## 31. Двухколесный автомобиль

Одним из примеров использования гироскопического эффекта на самодвижущихся экипажах был описанный в разделе 12 двухколесный велосипед, появившийся в конце XIX столетия. Устойчивость движущегося велосипеда натолкнула нашего соотечественника П. П. Шиловского [39] на мысль о двухколесном автомобиле, появившемся в 1914 г. на улицах Лондона (рис. 93).

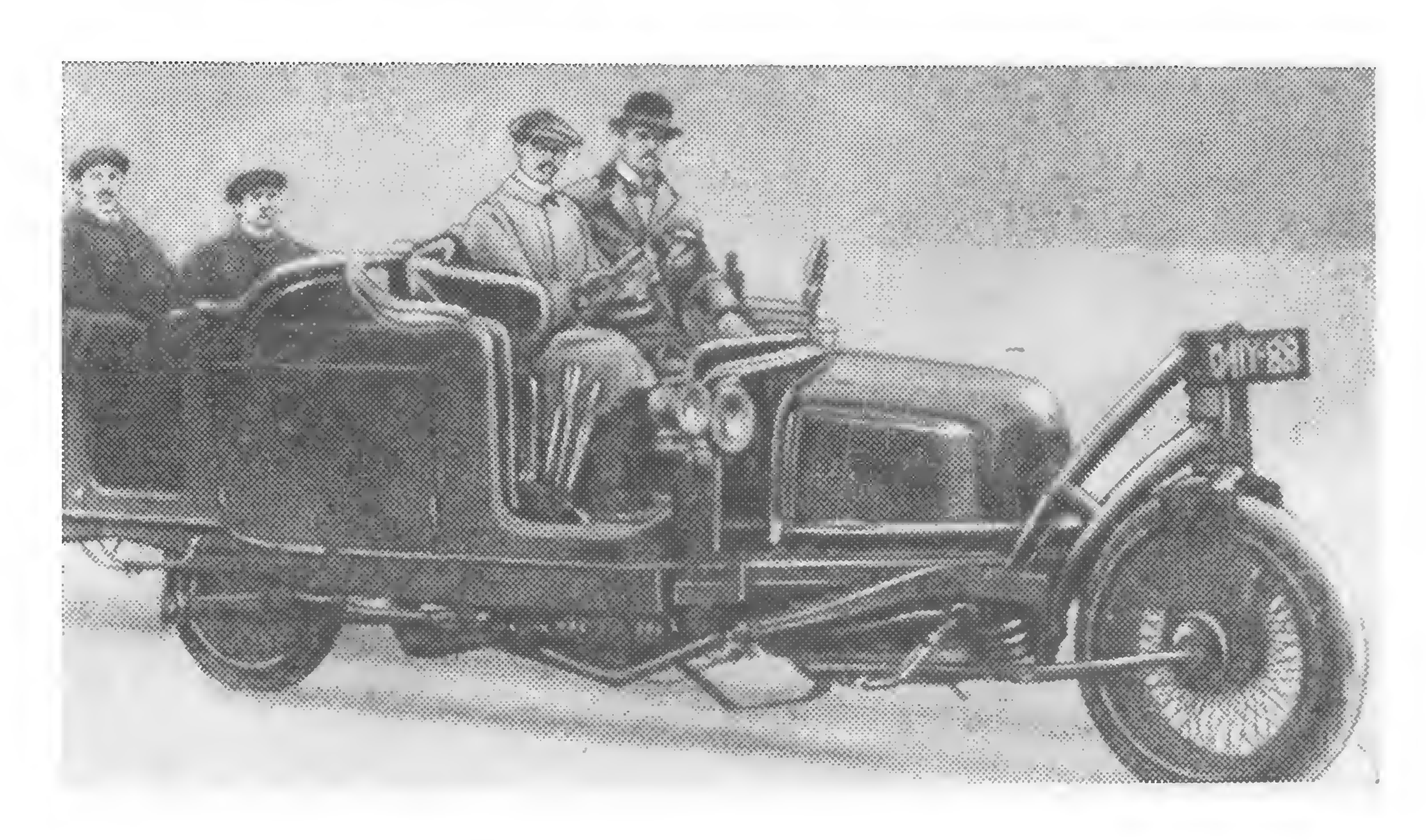


Рис. 93. Двухколесный автомобиль

Поражавший зрителей экипаж был снабжен гироскопом, обеспечившим ему устойчивость не только при движении, но и на остановке. Гироскоп, показанный на рис. 94, состоял из массивного ротора, вращающегося со скоростью Ω вокруг оси *АА* в рамке *ВК*, которая обладала возможностью поворота вокруг оси *ВВ* в кронштейнах, жестко закрепленных на днище кузова автомобиля. Рама *ВК* была связана зубчатой передачей с валом электродвигателя *ЭД*, управляемого переключателем *П*, продольная ось которого размещалась параллельно оси *ВВ*.

При посадке или при перемещениях пассажиров внутри автомобиля во время движения корпус машины стремился повернуться вокруг продольной оси $CC$. При этом металлический шарик $Ш$, перекатываясь в сторону наклона переключателя $П$, замыкал одну из двух пар управляющих контактов $К_1$ или $К_2$. Тем самым включался двигатель $ЭД$, создававший воздействовавший на гироскоп момент $М$. Под действием последнего гироскоп вместе с кузовом автомобиля получал в соответствии с из-

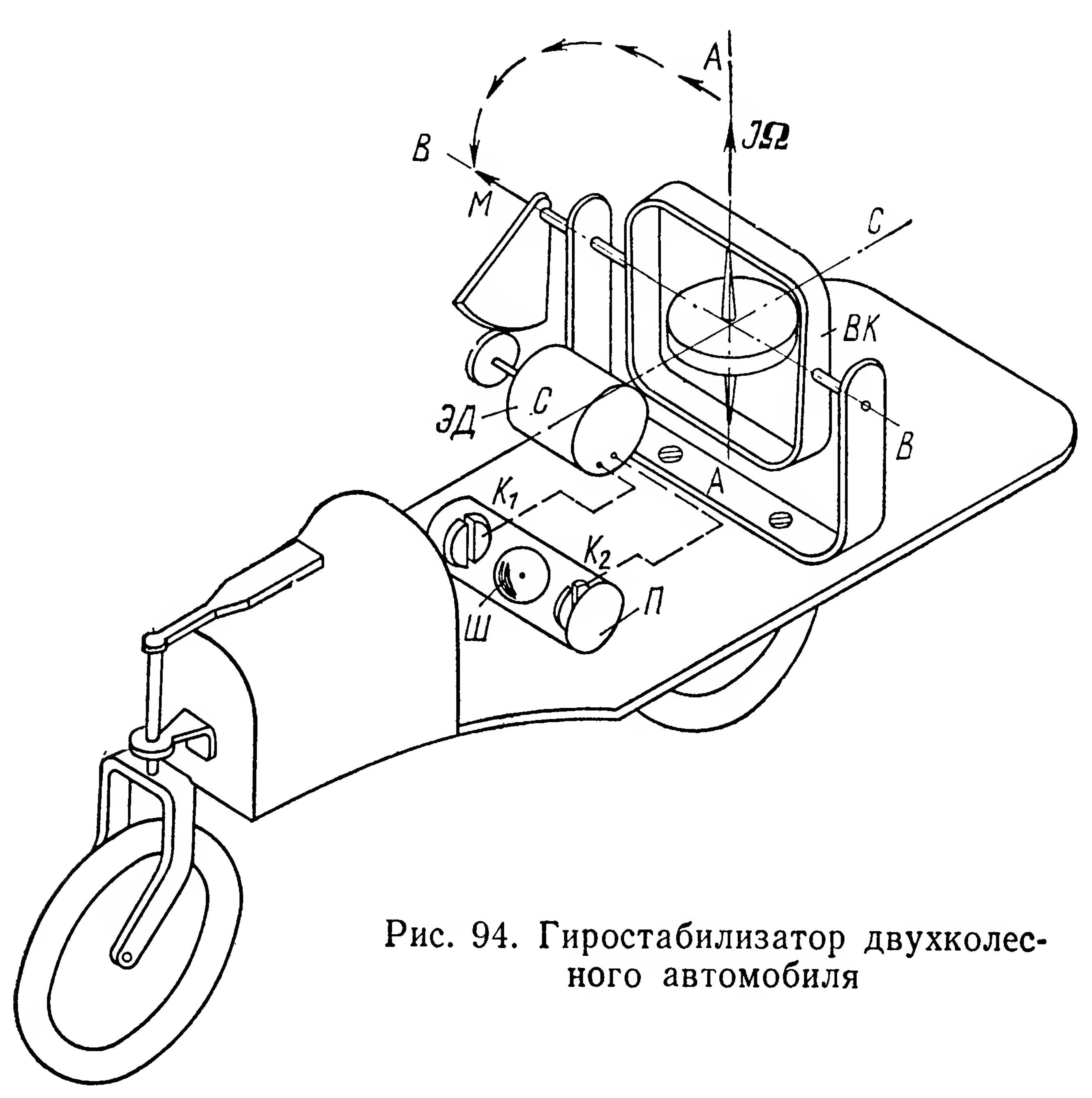


Рис. 94. Гиростабилизатор двухколесного автомобиля

ложенными в разделе 11 положениями прецессионное движение вокруг продольной оси $CC$ машины. При этом вектор кинетического момента $J\Omega$ гироскопа стремился прийти к совмещению с вектором момента $М$ по кратчайшему пути. В результате кузов автомобиля начинал выравнивать свое положение, уменьшая наклон к горизонту. Когда автомобиль вновь возвращался в горизонтальное положение, шар переключателя $П$ размыкал управляющие контакты, и действие на гироскоп момента $М$, а тем самым и поворот автомобиля вокруг оси $CC$, прекращались. В горизонтальном положении автомобиль находился до нового возмущения. Работа гироскопического стабилизатора повторялась, и горизонтальное положение экипажа снова восстанавливалось.

Уже первые поездки доказали простоту устройства двухколесного автомобиля и подтвердили возможность его практического использования даже в условиях городского движения. Но начавшаяся в 1914 г. первая мировая война не позволила изобретателю продолжить работу по усовершенствованию двухколес-

ного автомобиля. Постепенно идея была забыта, и только по прошествии почти полувека к ней вновь обратились автомобиле-

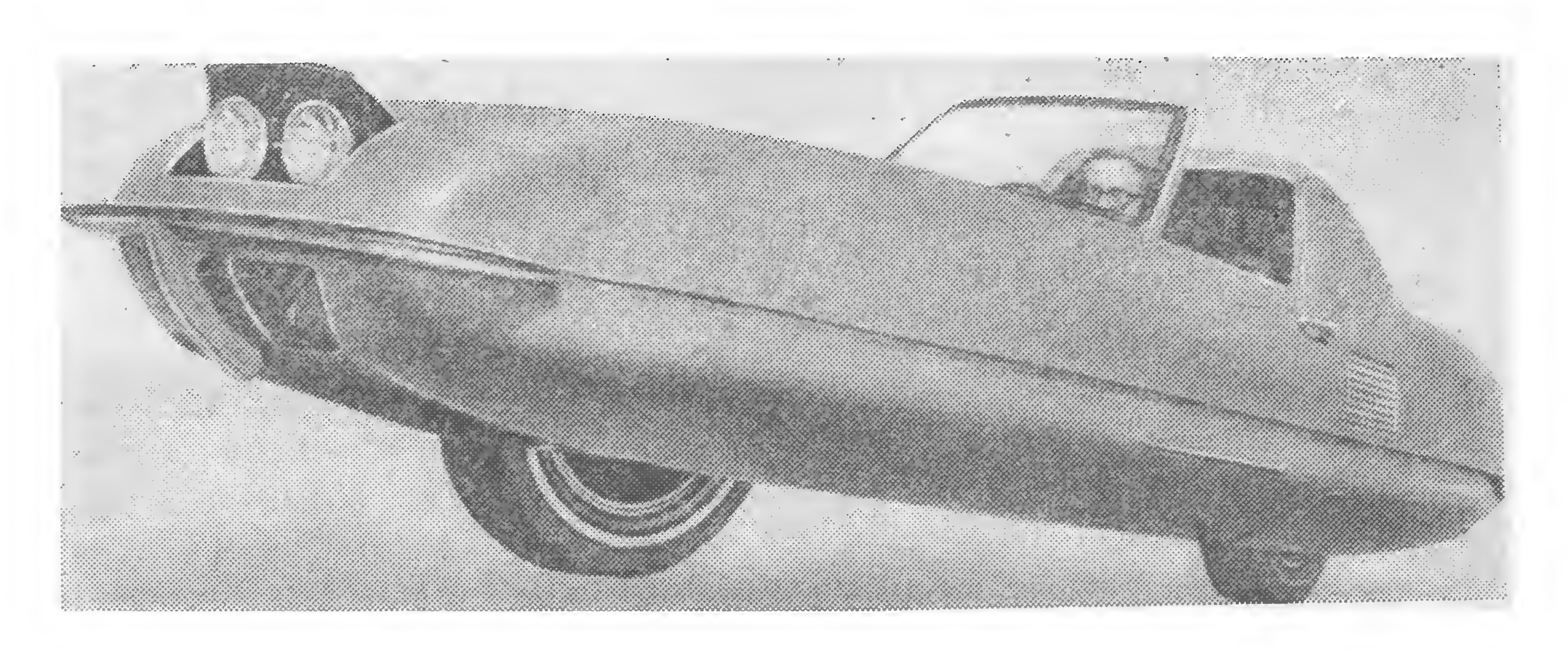


Рис. 95. Двухколесный автомобиль «Гирон-X»



Рис. 96. Размещение гироскопа на двухколесном автомобиле

строители. Так, на международной автомобильной выставке 1961 г. уже демонстрировалась модель нового двухколесного автомобиля, а в 1967 г. прошли испытания его первые образцы,

один из которых изображен на рис. 95. По аналогии с автомобилем Шиловского горизонтальное положение новой модификации такого транспортного средства стабилизировалось гироскопом, размещавшимся, как показано на рис. 96, под капотом машины. Ротор гироскопа диаметром 60 см вращался вокруг вертикальной оси с частотой 6000 об/мин. Новый автомобиль с двигателем мощностью 80 л. с. благодаря совершенной аэродинамической форме развивал скорость до 140 км/ч. Описываемый автомобиль, получивший название «гирон», был оборудован расположенными в задней части кузова двумя малыми колесами, автоматически выдвигавшимися из машины при достижении скорости ниже 5 км/ч. Они поддерживали автомобиль на стоянке, когда ротор гироскопа не вращался. Новый автомобиль нашел применение в труднодоступных горных районах. Он легко проходит по тропинкам, расположенным на косогорах с уклоном до 60°.

## 32. Однорельсовая железная дорога

Еще до изобретения двухколесного автомобиля предпринимались попытки создания однорельсовой железной дороги. Положительное решение проблемы сулило большие экономические выгоды. Так, при прокладке однорельсовой железной дороги нужно было укладывать лишь один рельс вместо двух, что почти вдвое сокращало расходы на сооружение полотна. Практически при одних и тех же затратах вдвое увеличивалась протяженность железнодорожных путей по сравнению с обычным двухрельсовым полотном.

Перспективы использования однорельсовых железных дорог вызвали появление многих проектов вагонов, способных сохранить устойчивость при движении по одному рельсу. В 1909 г. почти одновременно появились однорельсовые гироскопические вагоны русского инженера П. П. Шиловского, англичанина Л. Бренана и немца А. Шерля. По принципу устройства они напоминали гироскопический стабилизатор двухколесного автомобиля.

В однорельсовых вагонах используются два варианта размещения гироскопического стабилизатора: при первом главная ось гироскопа располагается вертикально, а при втором — горизонтально и перпендикулярно продольной оси вагона [48]. В соответствии с последним вариантом был изготовлен гироскопический стабилизатор однорельсового вагона Бренана, показанный на рис. 97. Массивный ротор монтировался на подшипниках в раме *ВК*, чем обеспечивалась свобода его вращения вокруг оси *АА*, параллельной днищу вагона. Рама *ВК* устанавливалась на подшипниках в станине *К*. Последняя жестко закреплялась в корпусе вагона так, чтобы плоскость гироскопа, образуемая его осями *АА* и *ВВ*, была перпендикулярна продольной оси *СС* вагона.

Сообщив ротору гироскопа вращение с частотой Ω вокруг оси $AA$, получим систему, движение которой подчиняется основ-

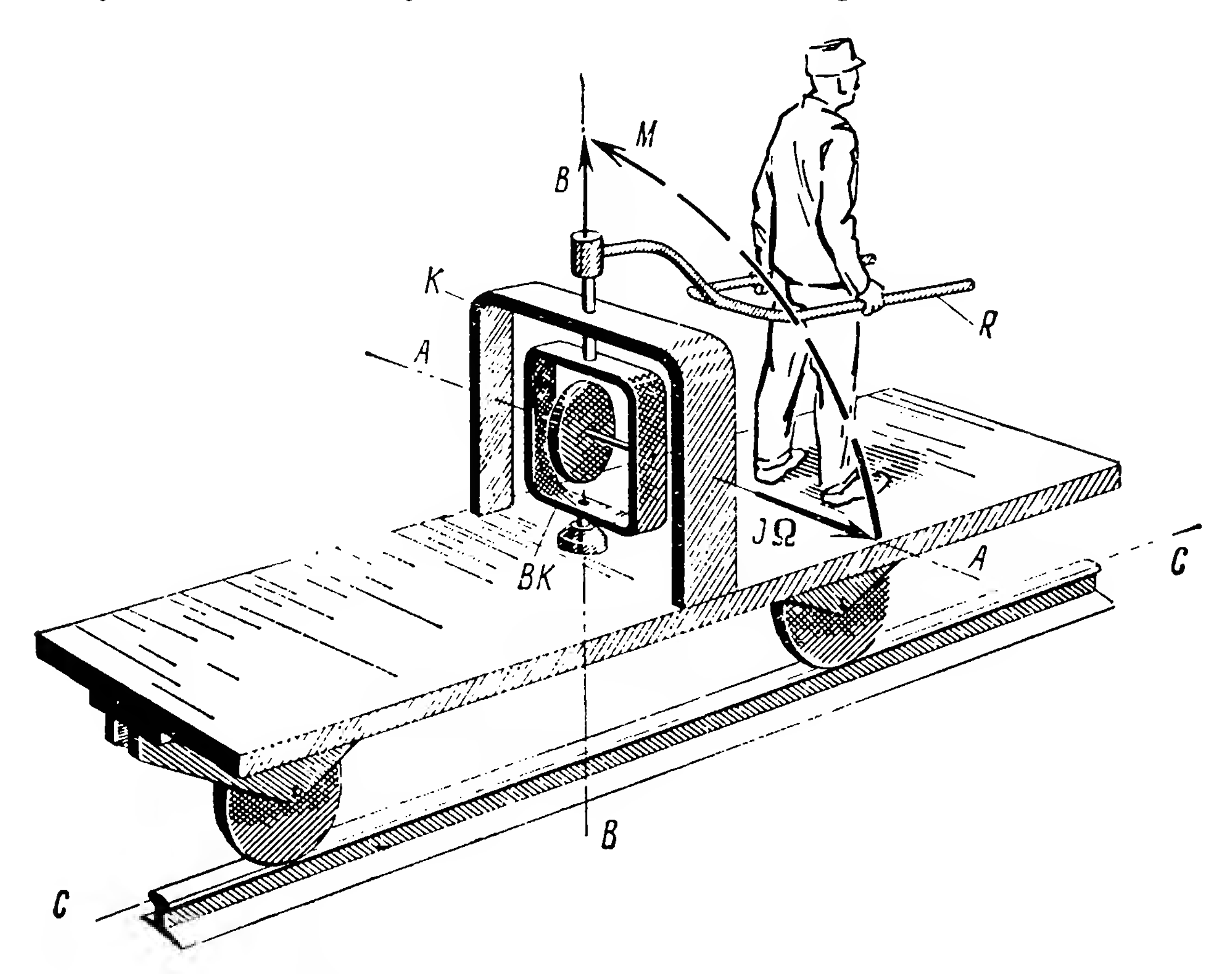



Рис. 97. Стабилизатор однорельсового вагона

Рис. 98. Однорельсовый вагон в движении

ному закону прецессии. Для приложения к гироскопу внешнего момента рама $BK$ снабжена рукояткой $R$. При наклоне вагона, например, на правый бок по ходу его движения водитель

нажимал на рукоятку $R$, стремясь повернуть ее влево и создавая действующий на гироскоп относительно оси $BB$ момент $M$, направленный против часовой стрелки (если смотреть на платформу сверху). Под влиянием этого момента гироскоп, обла-

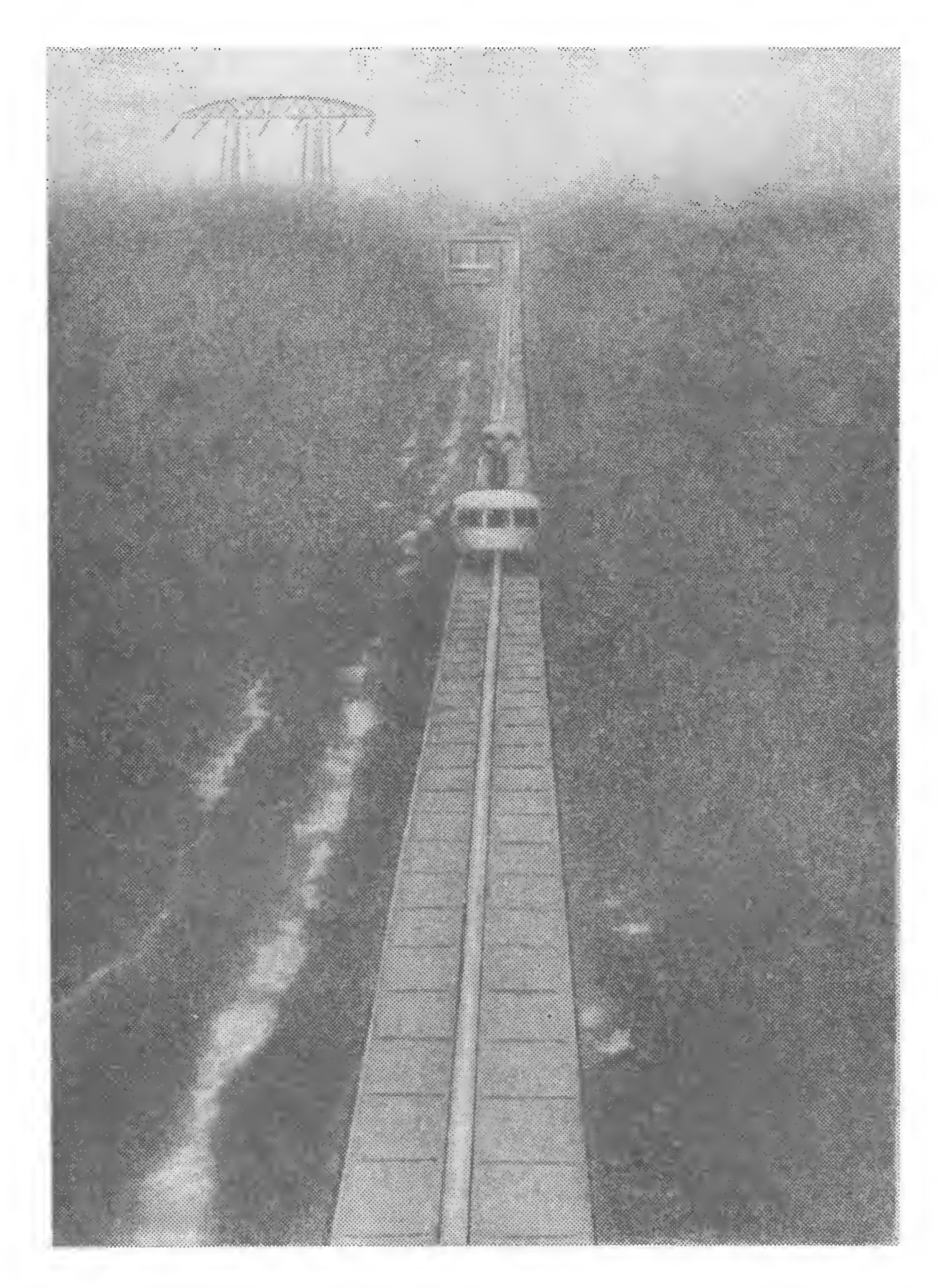


Рис. 99. Однорельсовая дорога 1966 г.

дающий кинетическим моментом $J\Omega$, получит прецессионное движение вокруг продольной оси $CC$ вагона. Ось $AA$ гироскопа кратчайшим путем пойдет на совмещение с вектором момента $M$. Станина $K$ жестко связана с корпусом вагона, поэтому последний также будет участвовать в прецессии гироскопа. В результате наклон вагона начнет уменьшаться, и в тот момент, когда платформа придет в горизонтальное положение, водитель

прекратит давить на рукоятку $R$. Описанная схема гироскопического стабилизатора была осуществлена в однорельсовом вагоне, построенном для выставки 1912 г. в Лондоне. Такой вагон, изображенный на рис. 98, вмещал до 40 человек. На нем перевозили по территории многочисленных посетителей, проявлявших живой интерес к необыкновенной железной дороге.

Однорельсовая железная дорога долгое время не получала развития. Начавшаяся первая мировая война 1914—1918 гг. поглощала все средства, что препятствовало усовершенствованию пути.

В 1922 г. в Советской России был разработан проект однорельсовой железной дороги системы Шиловского [39] для постройки ее на участке Ленинград — Гатчина. Но молодому социалистическому государству требовались большие средства для выполнения первоочередных мероприятий по восстановлению разрушенного войнами народного хозяйства, поэтому проект однорельсовой железной дороги в те годы осуществлен не был.

Разговоры об однорельсовых гироскопических дорогах надолго прекратились, и только в 1966 г. во Франции появился участок однорельсового пути, изображенный на рис. 99, по которому вагоны двигались со скоростью более 130 км/ч. Вагон новой однорельсовой дороги опирался на воздушную подушку, создаваемую между его корпусом и железобетонным рельсом мощными насосами. Движение вагона осуществлялось воздушным винтом, который приводился во вращении авиационным двигателем, расположенным над крышей вагона.

## 33. Одноколесный мотоцикл

Практическое использование гироскопического эффекта позволило энтузиастам создать в Ленинграде и Новокузнецке оригинальные конструкции одноколесных мотоциклов. В обоих вариантах колесо мотоцикла имеет два обода: внутренний и наружный, между которыми расположены стальные шарики, примерно так же как и в подшипнике (см. рис. 39). Наружный обод несет на себе зубчатое колесо, находящееся в зацеплении с ведущей шестерней. Последняя через коробку передач и механизм сцепления связана с валом двигателя, корпус которого жестко закреплен на внутреннем ободе. Кроме двигателя, как показано на рис. 100, на нем также смонтированы бензиновый бак, механизм сцепления, коробка передач, приборы управления и сиденье водителя. Благодаря такому размещению механизмов масса и момент инерции внутреннего обода колеса мотоцикла во много раз больше, чем у наружного. Вот почему при включении двигателя наружный обод начинает вращаться вокруг внутреннего, сохраняющего неизменным свое положение относительно плоскости горизонта. В результате мотоцикл приобретает движение в заданном направлении.

При вращении вокруг оси $OA$ с частотой $\Omega$ наружный обод развивает значительный кинетический момент $J\Omega$. Поэтому для выполнения поворота вокруг вертикальной оси $OC$, например вправо, водителю достаточно сместить центр массы своего тела в том же направлении. Относительно оси $OB$ при этом возникнет момент $M$, вектор которого будет направлен по ней в сторону движения мотоцикла. Этот момент вызовет прецессию гироскопа

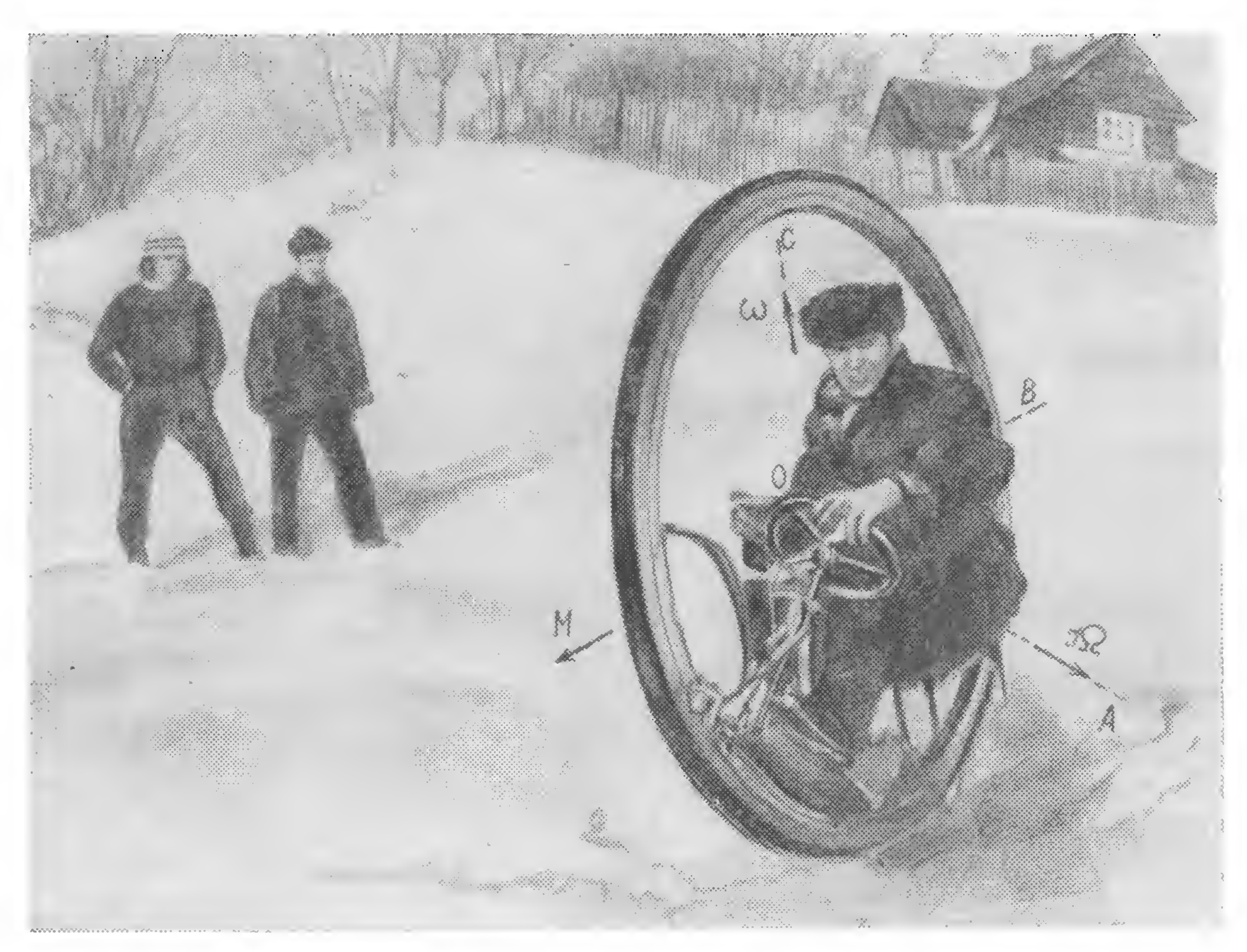



Рис. 100. Одноколесный мотоцикл

вокруг оси $OC$, в результате которой вектор кинетического момента $J\Omega$, а следовательно, и ось $OA$ колеса пойдут на совмещение с вектором внешнего момента $M$, в результате чего мотоцикл начнет поворачиваться вокруг оси $OC$ вправо.

Для поворота в левую сторону водителю достаточно сместить центр массы тела влево. Созданный момент заставит колесо поворачиваться в требуемом направлении вокруг вертикальной оси $OC$. Нетрудно заметить, что управление одноколесным мотоциклом подчинено тем же законам, что и управление двухколесным велосипедом (см. раздел 12), когда человек едет на нем, не держась руками за руль.

## 34. Гироскопические успокоители качки автомобиля и коляски мотоцикла

Автомобиль наряду с присущими ему достоинствами имеет и существенный недостаток, заключающийся в хаотической кач-

ке его кузова при движении по неровному пути, которая является причиной быстрого утомления пассажиров. Вот почему одновременно с промышленным освоением автомобиля конструкторская мысль искала пути повышения комфортабельности поездки в нем. Были использованы шины низкого давления, осуществлена независимая подвеска колес, листовые рессоры заменены более совершенными спиральными пружинами и торсионными стержнями, поставлены амортизаторы и реализован ряд других

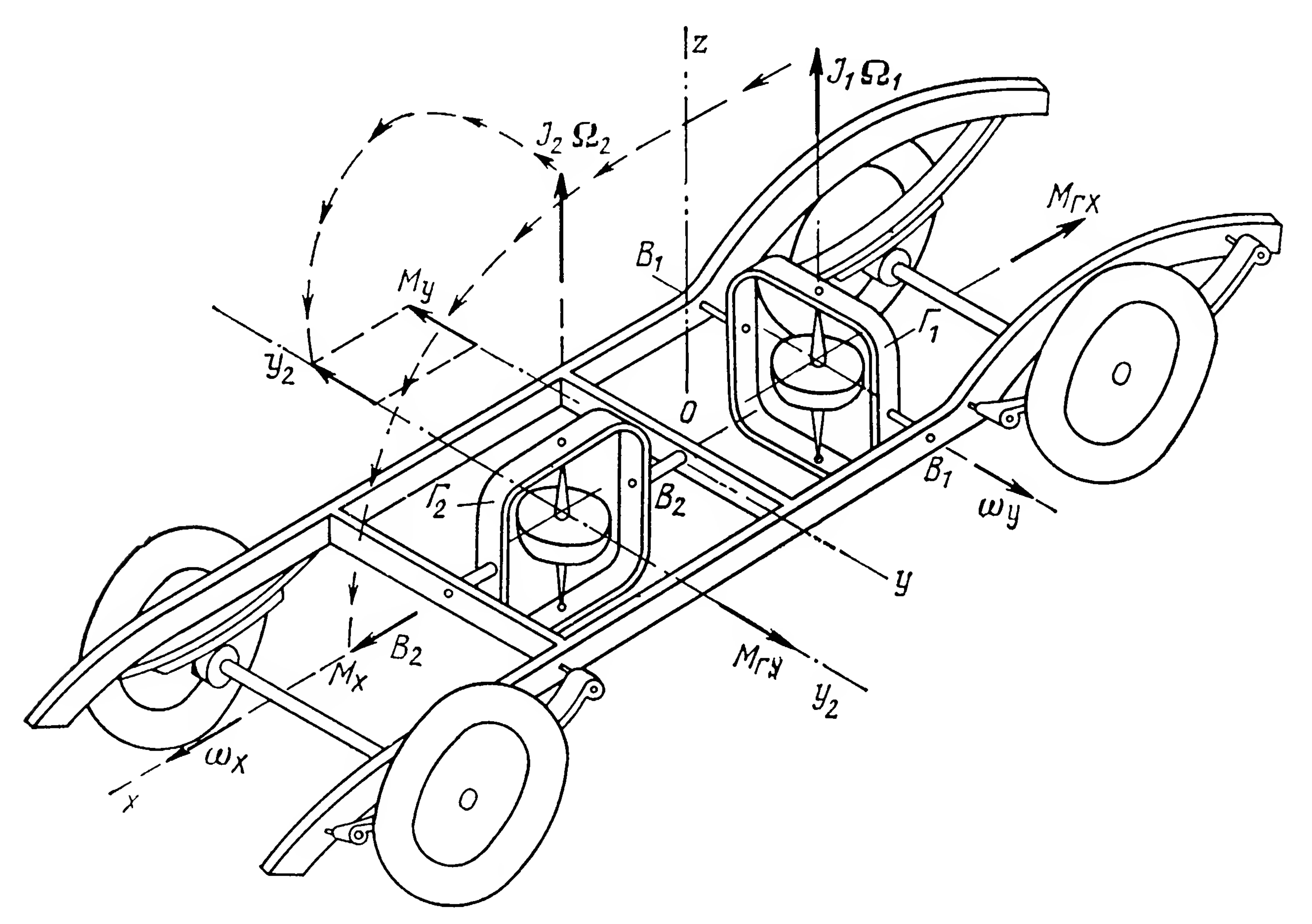



Рис. 101. Гироскопический успокоитель качки автомобиля

мероприятий. Однако даже лучшие образцы усовершенствованного автомобиля при езде по плохим дорогам испытывали настолько значительные колебания, что для их уменьшения приходилось резко снижать скорость движения.

Нужна была подвеска, которая гасила бы толчки, воспринимаемые автомобилем при езде с большими скоростями по плохой дороге. Решение проблемы было найдено с помощью гироскопа. В 1926 г. в Германии был предложен показанный на рис. 101 успокоитель качки автомобиля, который состоял из двух установленных на его раме гироскопов $Г_1$ и $Г_2$ с вертикальными главными осями. Каждый из них по отношению к раме автомобиля обладал двумя, а по отношению к колесам с рессорами тремя степенями свободы. Ось $B_1B_1$ подвеса гироскопа $Г_1$ располагалась параллельно поперечной оси $Oy$ автомобиля, а ось $B_2B_2$ гироскопа $Г_2$ совпадала с осью $Ox$.

Автомобиль при наезде передними колесами на препятствие передает через рессоры своей раме момент $M_y$, стремящийся повернуть машину вокруг оси $Oy$ в данном случае по часовой

стрелке. Однако гироскоп $\Gamma_2$, обладающий кинетическим моментом $I_2\Omega_2$, окажет противодействие указанному моменту. Прецессируя вокруг оси $Ox$ с угловой скоростью $\omega_x$, равной согласно формуле (7) величине

$$\omega_x = \frac{M_y}{I_2\Omega_2},$$

он создаст направленный по оси $Ox$ противоположно $M_y$ момент гироскопической реакции $M_{\text{г}y}$, который определяется по формуле (3)

$$M_{\text{г}y} = I_2\Omega_2\omega_x.$$

Подставив в последнюю зависимость значение $\omega_x$, получим

$$M_{\text{г}y} = I_2\Omega_2\omega_x = I_2\Omega_2 \frac{M_y}{I_1\Omega_1} = M_y.$$

Отсюда убеждаемся в равенстве моментов $M_{\text{г}y}$ и $M_y$. Нетрудно видеть, что возмущающий момент $M_y$ уравновесится гироскопи-

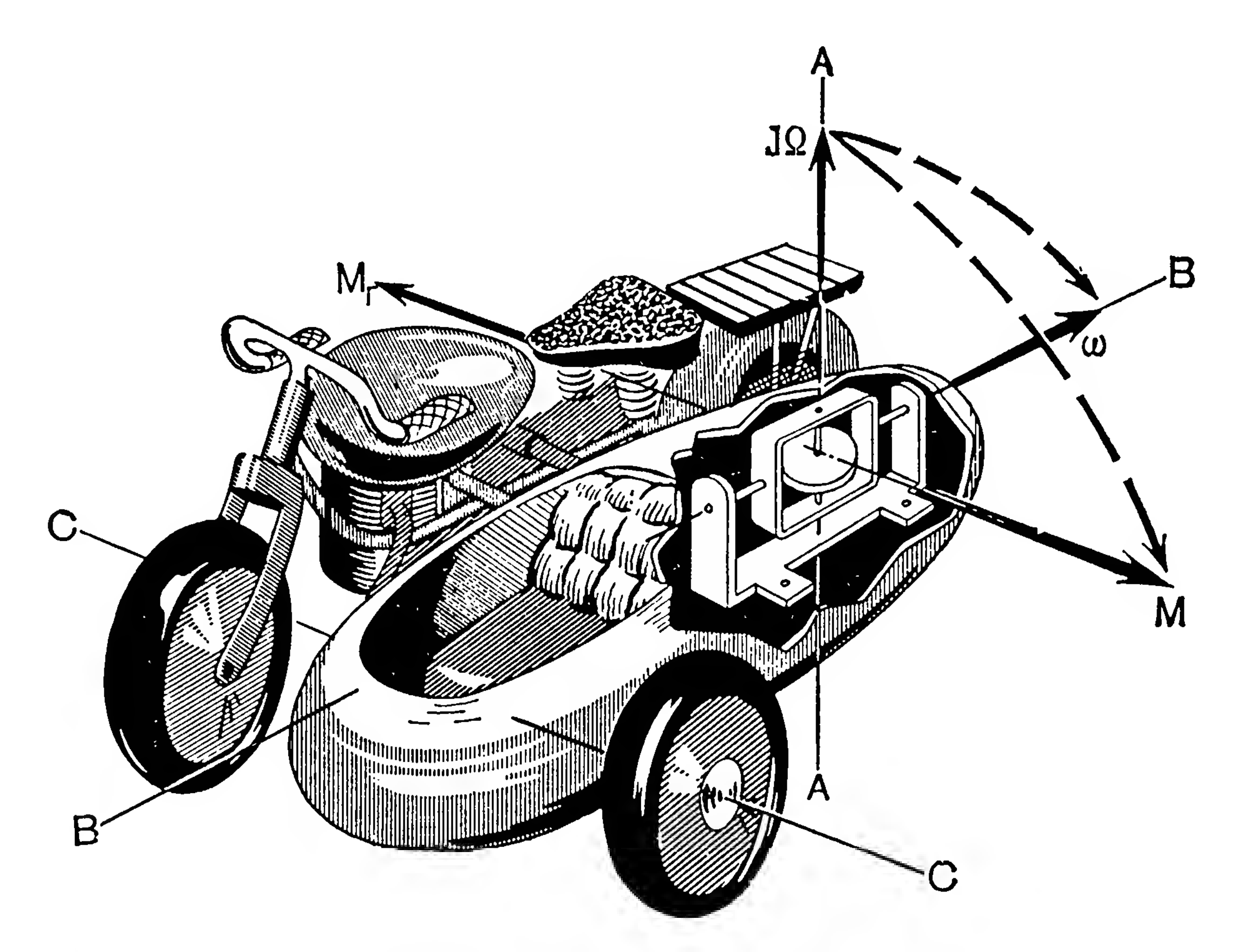



Рис. 102. Гироскопический успокоитель качки мотоцикла

ческим моментом $M_{\text{г}y}$, благодаря чему кузов автомобиля сохранит горизонтальное положение.

При наезде автомобиля на препятствие левыми колесами его рама воспримет момент $M_x$, стремящийся повернуть кузов автомобиля вокруг оси $Ox$. В этом случае начнет прецессировать гироскоп $\Gamma_1$, который, поворачиваясь вокруг оси $B_1B_1$ с угловой скоростью $\omega_y$, создаст момент гироскопической реакции

$$M_{\text{г}x} = I_1\Omega_1\omega_y = I_1\Omega_1 \frac{M_x}{I_2\Omega_2} = M_x.$$

Последний и уравновесит возмущающий момент $M_x$.

В описываемой конструкции предусмотрены ограничители поворотов гироскопов вокруг осей $B_1B_1$ и $B_2B_2$. Правда, в связи с непрерывными изменениями направлений возмущающих моментов $M_x$ и $M_y$ гироскопы редко ложатся на опоры. Поэтому небольшие по габаритам гироскопы, масса которых не превышает 1—2 % общей массы автомобиля, обеспечивают сохранение горизонтального положения его кузова даже при быстрой езде по неровным трассам. Это качество имеет большое значение для санитарных машин, перевозящих больных по полевым и проселочным дорогам.

В середине текущего столетия в Советском Союзе был создан гироскопический стабилизатор коляски мотоцикла, схематически показанный на рис. 102. Гироскоп с двумя степенями свободы

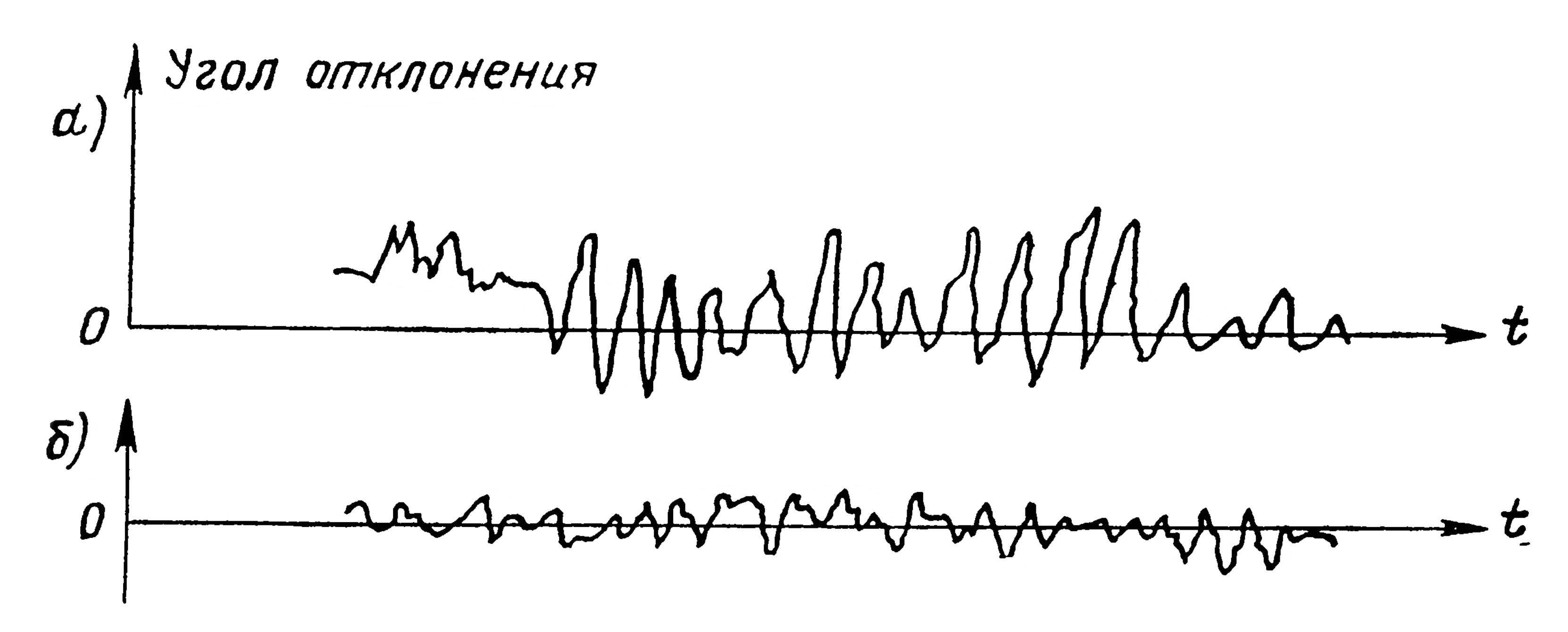



Рис. 103. График колебаний коляски мотоцикла при движении по булыжной мостовой со скоростью 35 км/ч: *а* — при выключенном гиростабилизаторе; *б* — при включенном гиростабилизаторе

устанавливается в ней так, чтобы его главная ось $AA$ была вертикальна, а ось подвеса $BB$ совмещалась с продольной осью коляски.

Если переднее колесо движущегося мотоцикла проваливается в выбоину на дороге, то мотоцикл, действуя силой своей тяжести на коляску, создаст момент $M$, который будет стремиться повернуть ее вокруг поперечной оси. Под влиянием этого момента гироскоп начнет прецессировать вокруг оси $BB$ с угловой скоростью $\omega = \frac{M}{I\Omega}$. Возникающий при этом гироскопический момент будет

$$M_\text{г} = I\Omega\omega = I\Omega\frac{M}{I\Omega} = M.$$

Отсюда следует, что он уравновесит внешний возмущающий момент $M$, обеспечивая тем самым стабилизацию коляски относительно поперечной оси $CC$. Экспериментальные кривые колебаний коляски мотоцикла, приведенные на рис. 103, подтверждают эффективность гироскопического стабилизатора при успокоении колебаний подвижных повозок при движении по неровным дорогам.

## 35. Гиробус

Примеры гироскопической стабилизации самодвижущихся платформ показывают, каким огромным запасом энергии может обладать ротор гироскопа. Конструкторы давно искали пути практического использования этой энергии, но только в 1956 г. на улицах швейцарских городов появился необычный транспорт. Это не был ни автобус, ни троллейбус. Пока это необычное средство передвижения двигалось, оно было похоже на автобус, но выхлоп газов из его двигателя отсутствовал. На остановках же над крышей машины поднимались три штанги, кото-

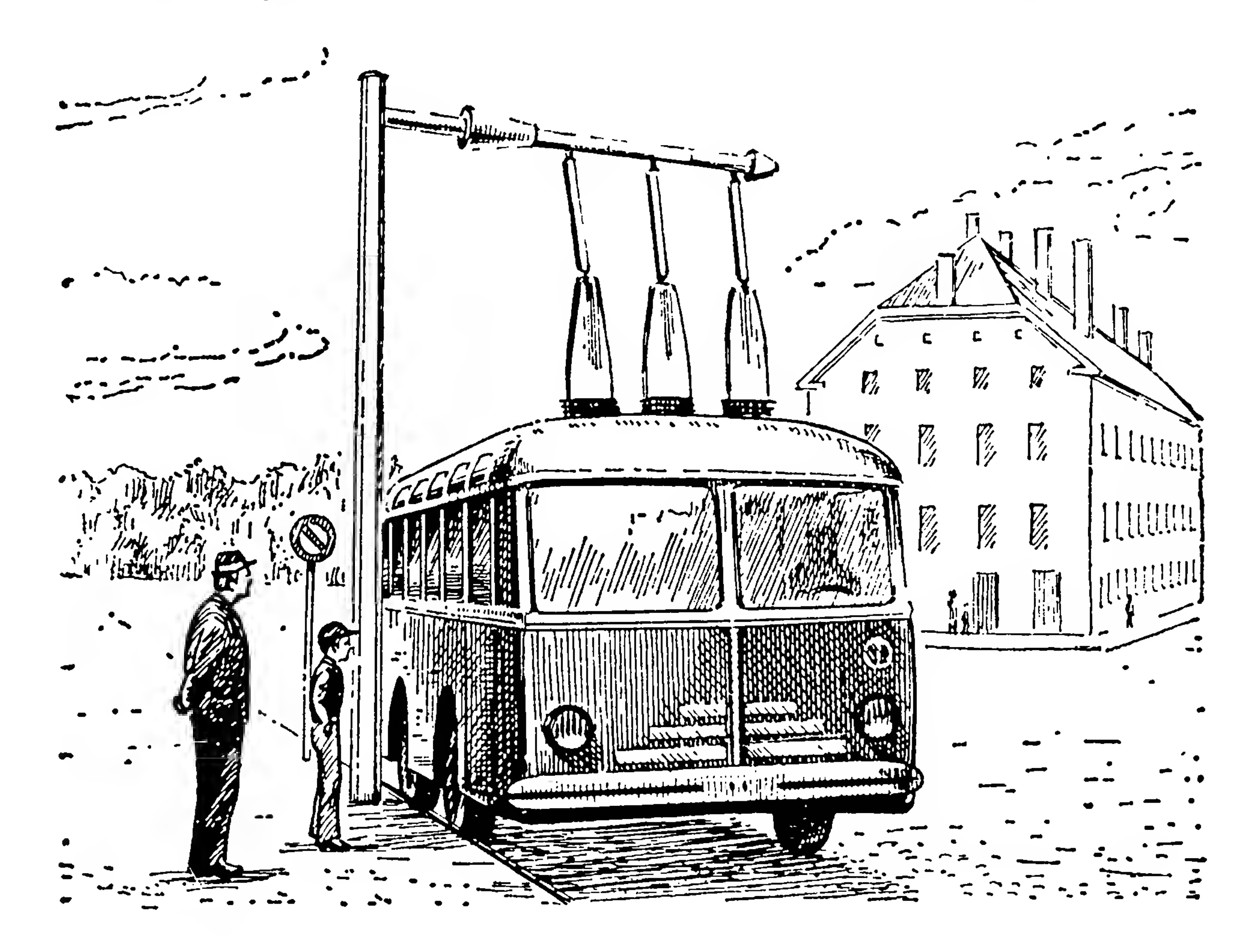


Рис. 104. Гиробус

рые видны на рис. 104, и она становилась похожей на троллейбус. На машине, получившей название гиробус, был установлен массивный ротор диаметром 1,5 м и массой 1,5 т. На определенных остановках, расположенных на расстоянии 5—6 км друг от друга, когда штанги подключались к смонтированным на специальном столбе контактам, на электрический двигатель машины подавался ток от городской сети. Жестко соединенный с ней ротор раскручивался, достигая за 1 мин частоты вращения около 3000 об/мин. При дальнейшем движении штанги автоматически отключались, и машина перемещалась за счет энергии, запасенной ротором на стоянке.

В целях более экономного расходования энергии вращающегося ротора последний был заключен в герметический кожух, заполненный водородом. Тем самым улучшалось охлаждение и снижались потери энергии на преодоление ротором сил трения.

После того как питание электродвигателя прекращалось, ротор по инерции продолжал вращать вал двигателя, работающего теперь уже как генератор. Вырабатываемая им энергия

подавалась на электрические двигатели, вращающие колеса гиробуса. Энергии, запасенной ротором на стоянке, было достаточно для проезда гиробусом девяти километров со скоростью 60 км/ч при полной нагрузке.

У нас в Советском Союзе получили распространение **гировозы**, которые широко применяются на подземных железных дорогах в шахтах. Исходя из требований взрывобезопасности, ротор такого гироскопа раскручивают на зарядной станции пневматическим двигателем. Через 3—4 секунды, когда частота его вращения достигает 3000 об/мин, пневмодвигатель отклю-

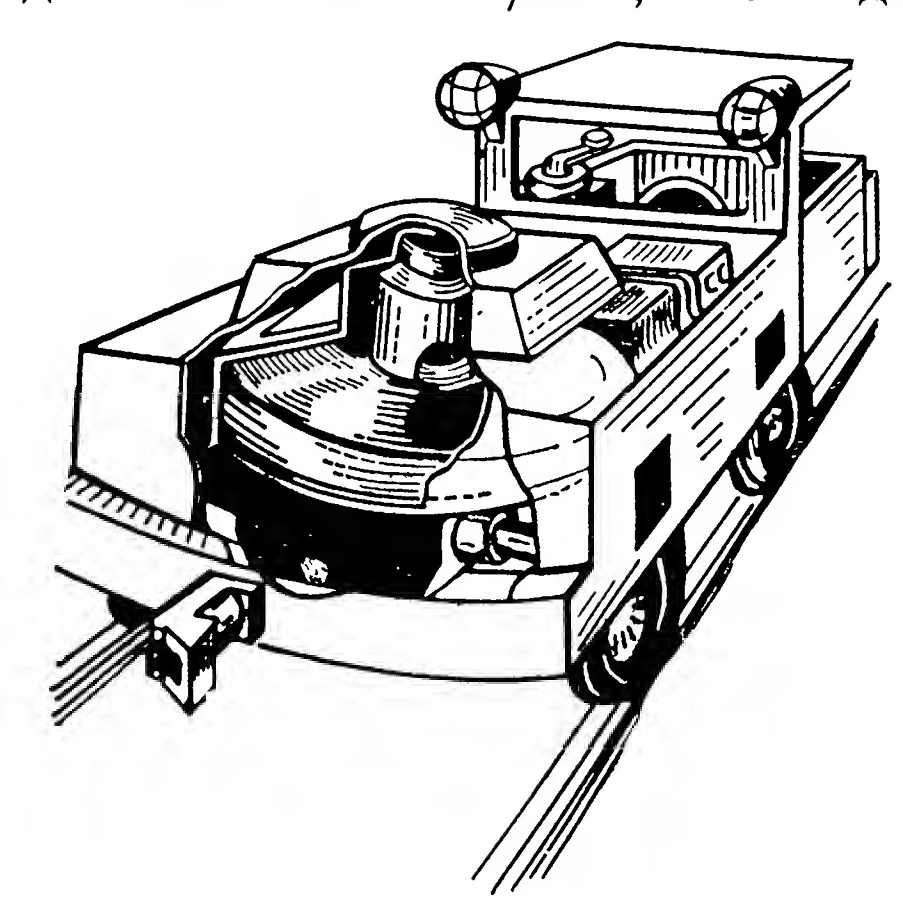


Рис. 105. Гировоз

чается. Затем к ротору через муфту сцепления присоединяется редуктор, передающий вращение на ведущие колеса гировоза. Чтобы избежать опрокидывания гировоза на закруглениях пути, главная ось гироскопа располагается вертикально, как это и показано на рис. 105.

## 36. Использование гироскопического момента для балансировки колес автомобиля на ходу машины

Для динамической балансировки колес движущегося автомобиля было предложено устройство, изображенное на рис. 106, которое состоит из полого кольца *ПК*, устанавливаемого внутри втулки колеса. В это кольцо засыпают свинцовые шарики, заливаемые вязкой жидкостью.

Если колесо динамически неуравновешено и его главная центральная ось инерции $OA$, как показано на рис. 107, образует с осью вращения $OD$ угол $\varepsilon$, то при его вращении вокруг оси с угловой скоростью $\Omega$ возникнет момент гироскопической реакции. Действительно, в рассматриваемом случае ротор гироскопа, обладающий кинетическим моментом $I\Omega\cos\varepsilon$, совершает вращение не только вокруг оси $OA$, но и вокруг оси $OE$

с угловой скоростью $\Omega \sin \varepsilon$. В силу этого возникает гироскопический момент $M_г = I\Omega \cos \varepsilon \cdot \Omega \sin \varepsilon$, вектор которого будет проходить через точку подвеса $O$ перпендикулярно плоскости чертежа.

Под влиянием момента $M_г$ свинцовые шарики, число которых на рисунке условно ограничено двумя, начнут по аналогии

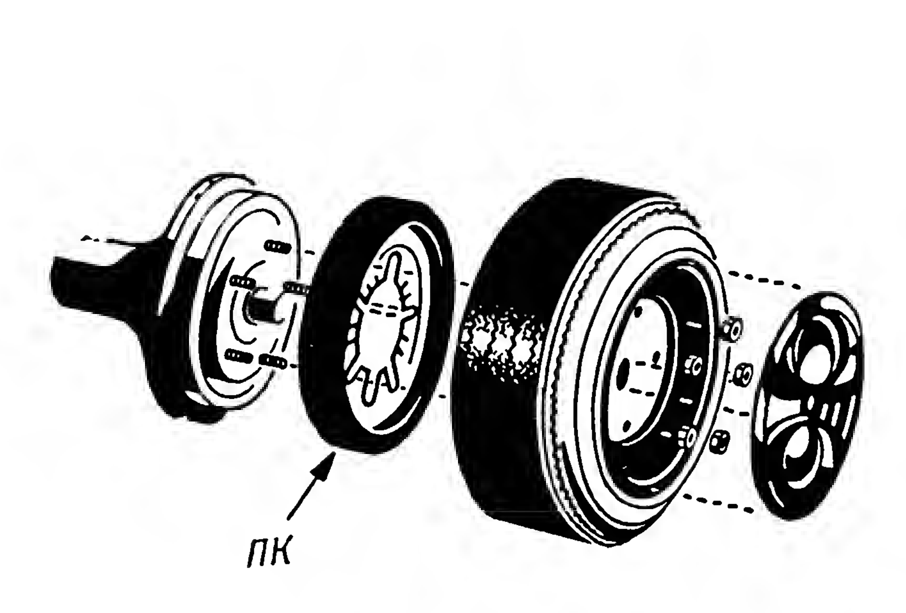



Рис. 106. Гироскопический балансировщик колес автомобиля

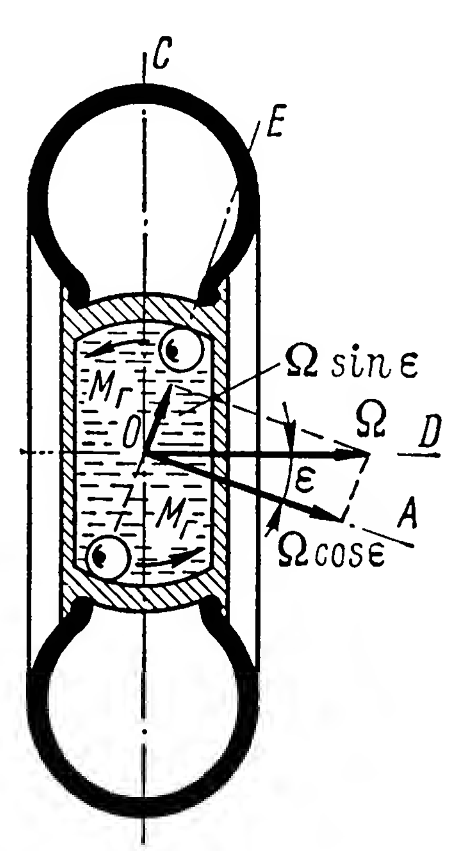
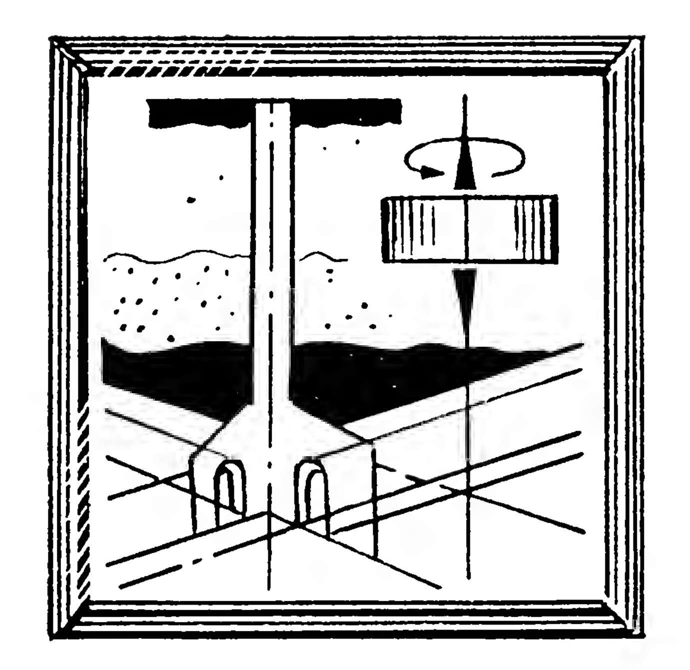



Рис. 107. Принцип работы гироскопического балансировщика колес автомобиля

с движением гибкого ротора (см. рис. 26) отклоняться от плоскости, пересекающей чертеж по прямой $OE$, стремясь к совмещению с прямой $OC$. Тем самым динамическая неуравновешенность колеса начнет уменьшаться, и, как только его избыточная масса совместится с плоскостью, проходящей через прямую $OC$, колесо автомобиля будет автоматически сбалансировано. Угол $\varepsilon$ станет равным нулю, и биения колеса на ходу машины прекратятся.






# ГИРОСКОП В ГОРНОМ ДЕЛЕ

## 37. Потребность в приборах, обеспечивающих быстрое исследование природных богатств

Внутреннее строение Земли и процессы, происходящие в глубинах ее недр, так же как и в космосе, издавна привлекали внимание человека. Между тем наши познания в этой области все еще недостаточны. Уже на глубине 10—15 км от земной поверхности начинается зона, о строении которой имеются только предположения.

В то же время задачи, стоящие перед нашим социалистическим обществом, требуют все возрастающего по своим масштабам снабжения бурно развивающейся промышленности металлом, углем, нефтью, газом и другими полезными ископаемыми. Для планирования развития народного хозяйства на научной основе необходимо иметь точные данные о запасах природных богатств, находящихся как в недрах Земли, так и на ее поверхности, в водах рек, морей и океанов.

За годы Советской власти наша страна вышла на первое место в мире по величине разведанных запасов многих видов полезных ископаемых. В СССР действуют такие крупнейшие каменноугольные бассейны как Кузбасс, Караганда, Печора и им подобные. В районе Курской магнитной аномалии открыто уникальное месторождение железной руды, занимающее одно из первых мест в мире. Благодаря самоотверженному труду геологов народное хозяйство Советского Союза в достаточной степени обеспечено разнообразными полезными ископаемыми.

Работы по составлению геологической карты нашей страны требуют создания новых приборов, способных обеспечить автоматизацию производства и контроль за ходом разведывательных работ. Отечественная приборостроительная промышленность создала разнообразную дистанционную аппаратуру для геофизических исследований и автоматические устройства, ускоряющие геологические поиски. В этом комплексе все большее значение приобретают гироскопические приборы. Уже сейчас у геологов имеются гироскопические инклинометры для контроля

кривизны буровых скважин, гироскопические стабилизаторы магнитометров, маркшейдерские гироскопические компасы для подземного ориентирования шахт и ряд других систем.

## 38. Гироскопический инклинометр

Наиболее достоверные сведения о наличии запасов полезных ископаемых можно получить путем проведения разведывательных работ методом бурения скважин. С этой целью в нескольких точках района, предназначенного для исследования, производят бурение скважин, из которых на разной глубине берут для анализа пробы грунта. Однако вследствие различной твердости пород, через которые проходит скважина, ее ось, как правило, отклоняется от первоначального направления. Искривление скважины, усложняя работу, не позволяет также составить правильное представление о запасах полезных ископаемых в данном районе. Предположим, что при бурении скважины, как показано на рис. 108, сверло наткнулось на граничный валун *K* и отклонилось от заданного направления *ZZ*. Дальнейшее углубление скважины будет производиться уже вдоль прямой *CD*. Вынутые из нее пробы грунта не будут содержать породы пласта *M*, обладающего полезными залежами.

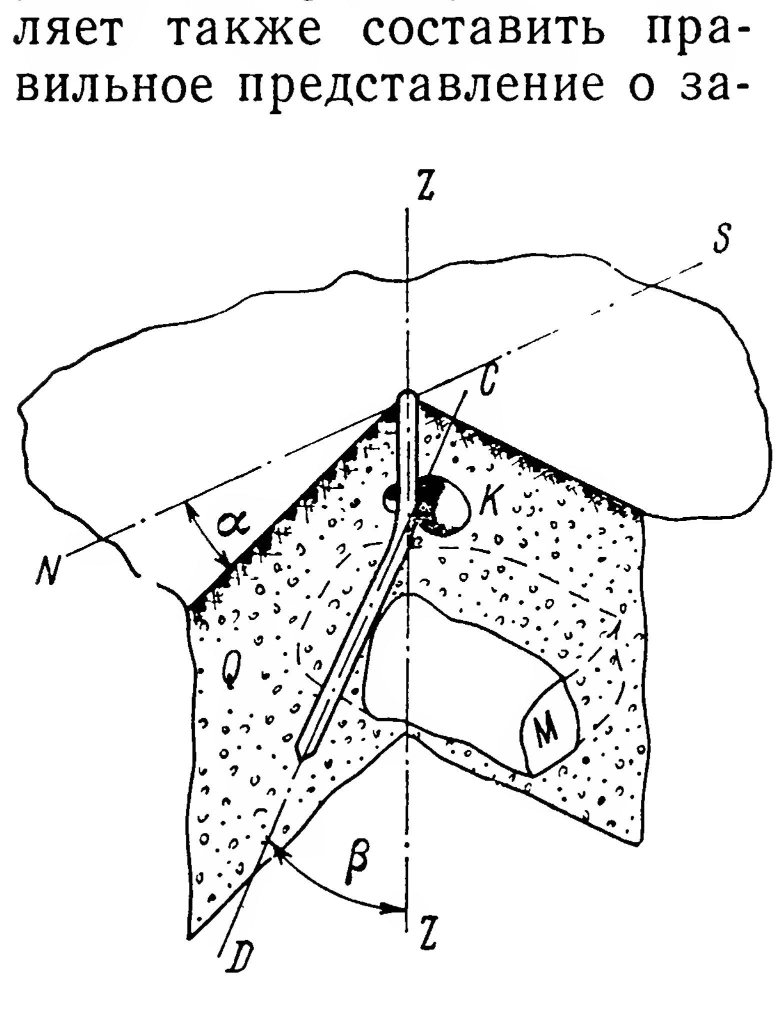



Рис. 108. Искривление буровой скважины

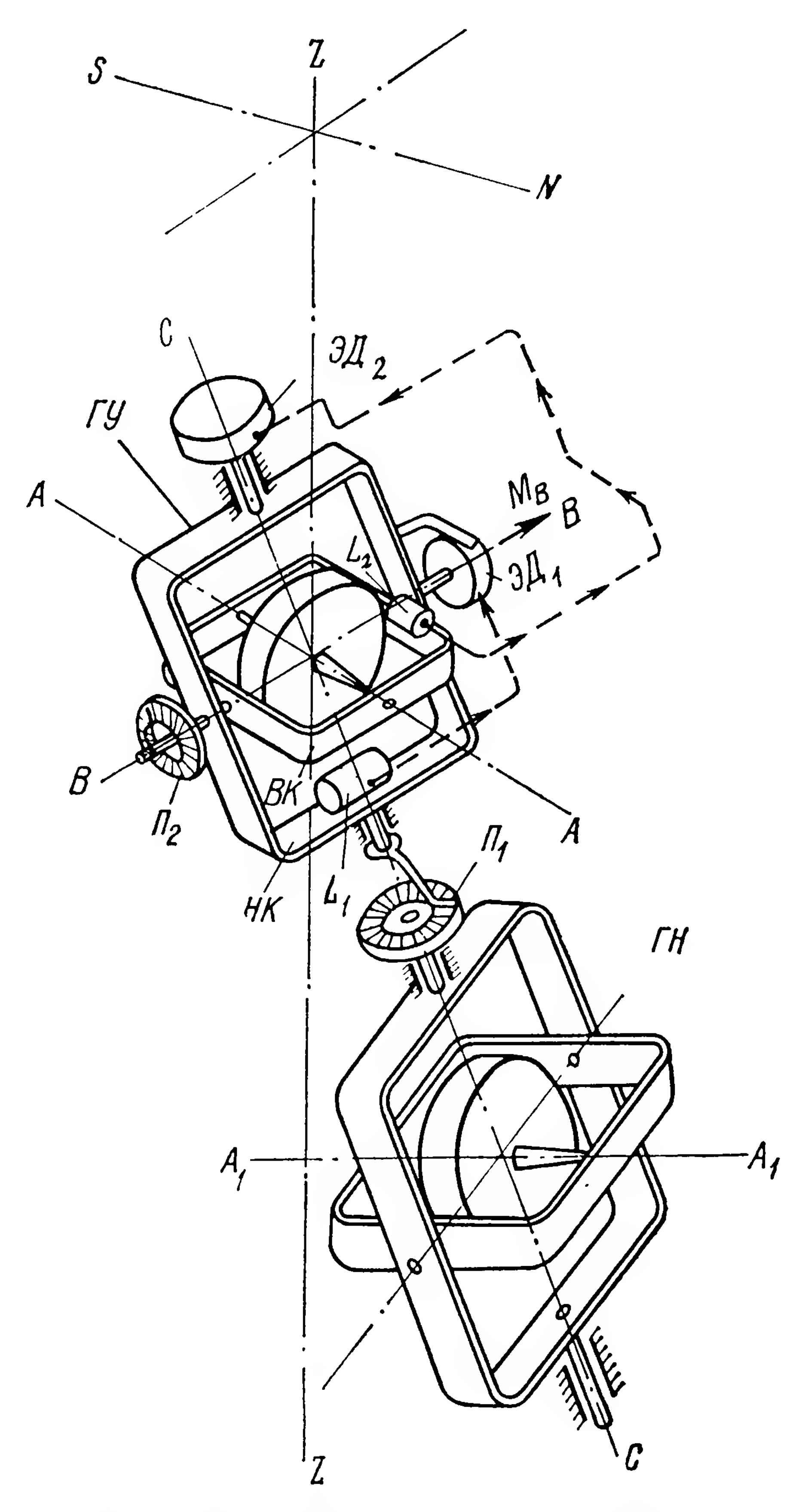



Рис. 109. Принципиальная схема гироинклинометра

Требовалось разработать такие методы контроля направления буровых скважин, которые позволяли бы измерять как угол $\beta$ отклонения оси $CD$ скважины от вертикали $ZZ$, так и угол $\alpha$ отклонения плоскости $Q$ искривления скважины от меридиана $NS$. С этой целью и были созданы инклинометры — приборы, в основе которых лежали магнитная стрелка и маятник. Однако они не обеспечивали непрерывного измерения углов $\alpha$ и $\beta$ в процессе опускания в скважину контрольного прибора. Требовалась довольно продолжительная его выдержка в неподвижном положении для успокоения колебаний магнитной стрелки и маятника, после чего только и можно было производить измерения.

Кроме того, магнитная стрелка, реагируя на залежи железных масс, дает сильно искаженные показания угла $\alpha$. Вот почему только использование гироскопа позволило создать надежно работающий инклинометр. Измерительное устройство современного советского гироинклинометра, изображенного на рис. 109, состоит из гироскопов направления *ГН* и уровня *ГУ*. Ось $AA$ последнего принудительно приводится к совмещению с плоскостью искривления скважины. Для этого на его наружном кольце *НК* устанавливается ртутный маятниковый переключатель $L_1$. До тех пор пока кольцо *НК* не будет перпендикулярно плоскости $Q$ (см. рис. 108), ртуть переключателя $L_1$ замыкает один из его контактов, обеспечивая подачу тока на электродвигатель $ЭД_1$. Двигатель развивает в этом случае момент $M_в$, который действует на гироскоп *ГУ* относительно оси $BB$, порождая тем самым его прецессию вокруг оси $CC$. В результате ось $AA$ гироскопа *ГУ* пойдет на совмещение с плоскостью искривления скважины. В момент когда это совмещение произойдет, переключатель $L_1$ займет

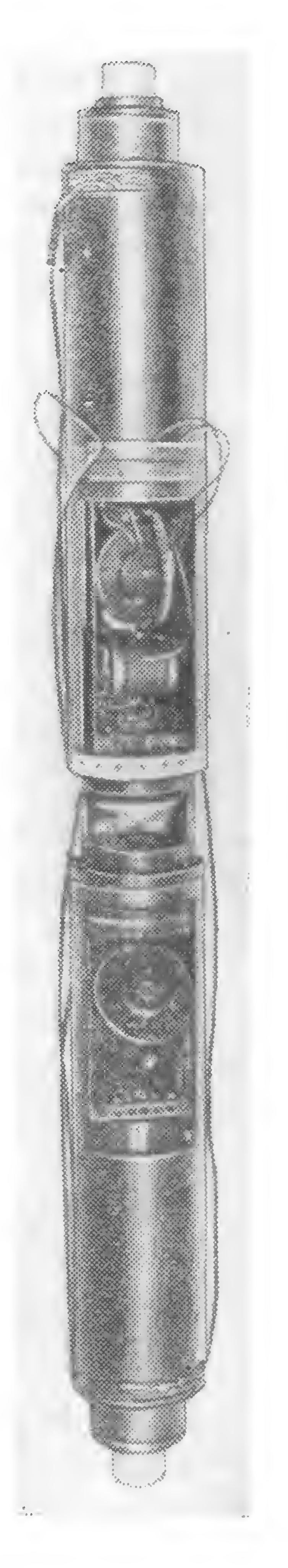


Рис. 110. Общий вид гироинклинометра

горизонтальное положение, и ток в цепи электродвигателя $ЭД_1$ прервется.

Ось $A_1A_1$ гироскопа *ГН* предварительно совмещается с плоскостью меридиана. Поэтому угол между плоскостями, проходящими через ось $CC$ и оси $AA$ и $A_1A_1$ обоих гироскопов, будет характеризовать угол $\alpha$ (см. рис. 108) отклонения плоскости наклона скважины от плоскости меридиана. Его величина определится в выбранном масштабе напряжением, снимаемым

с потенциометра $П_1$, установленного на наружном кольце гироскопа *ГН*. Ось *AA* гироскопа *ГУ* одновременно с приведением ее в плоскость искривления скважины совмещают еще и с плоскостью горизонта. На кольце *ВК* смонтирован переключатель $L_2$, ртуть которого при наклоне оси *AA* замыкает один из двух контактов, подавая ток соответствующего направления на электродвигатель $ЭД_2$. Последний создает относительно оси *CC* момент, который и заставляет гироскоп *ГУ*, прецессирующий вокруг оси *BB*, привести свою ось *AA* к совмещению с горизонтом. Благодаря совмещению оси *CC* гироскопа *ГУ* с осью скважины, а оси *BB* — с плоскостью ее искривления по величине угла между плоскостями наружного *НК* и внутреннего *ВК* колец подвеса можно судить и о значении угла β (см. рис. 108) наклона скважины к горизонту. Последнее определяется величиной напряжения, снимаемого с потенциометра $П_2$, который установлен на внутренней оси *BB* гироскопа *ГУ*. Таков принцип работы гироскопического инклинометра. Конструкция его измерительной части показана на рис. 110.

Замена магнитной стрелки и маятника гироскопами позволила избежать воздействия на инклинометр магнитных полей, обеспечив возможность быстро и непрерывно контролировать кривизну скважины и автоматически записывать изменения углов α и β по всей ее глубине.

## 39. Гироскопический стабилизатор магнитометра

Наша Земля является естественным магнитом, в поле которого находится все на ней живущее. Полюсы $N_m$ и $S_m$ этого магнита, как изображено на рис. 111, не совмещены с ее географи-

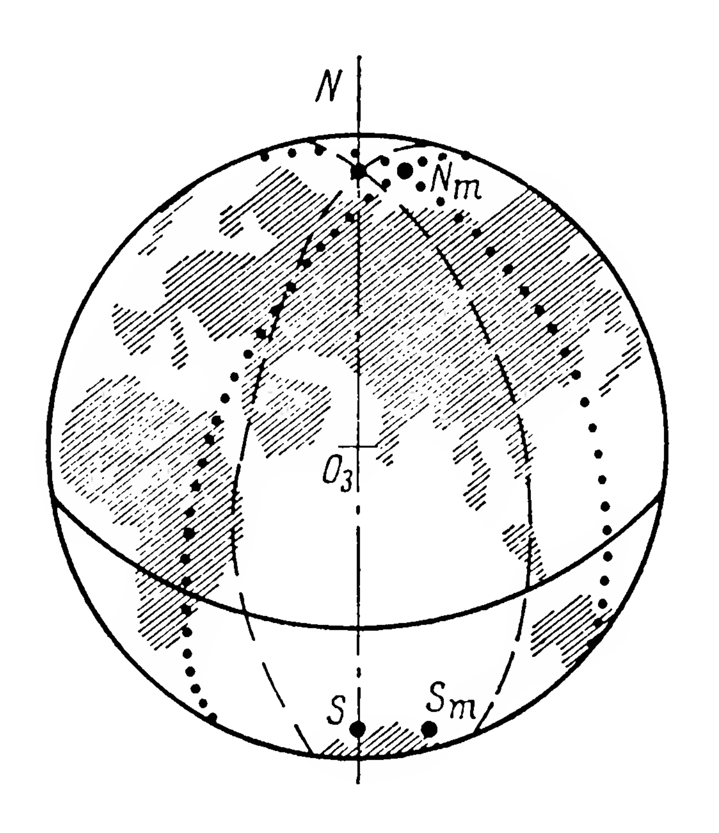



Рис. 111. Положение географического и магнитного меридианов Земли

ческими полюсами *N* и *S*. Угол между плоскостями обоих меридианов, называемый углом магнитного склонения, и угол магнитного наклонения, образуемый вектором напряженности магнитного поля Земли с горизонтом, в каждом

пункте земной поверхности различны как по величине, так и по направлению. Однако указанные величины подчиняются определенным законам, на основе которых и составляются магнитные карты.

Указанные закономерности в некоторых случаях нарушаются магнитными аномалиями, свидетельствующими о залежах в недрах данного района железных руд. Для измерения углов склонения и наклонения, или так называемых параметров магнитного поля Земли, применяются специальные приборы, называемые магнитометрами. Они, как показано на рис. 112, состоят из трех феррозондов *З*, установленных взаимно перпендикулярно на площадке *П*. Каждый феррозонд, схема

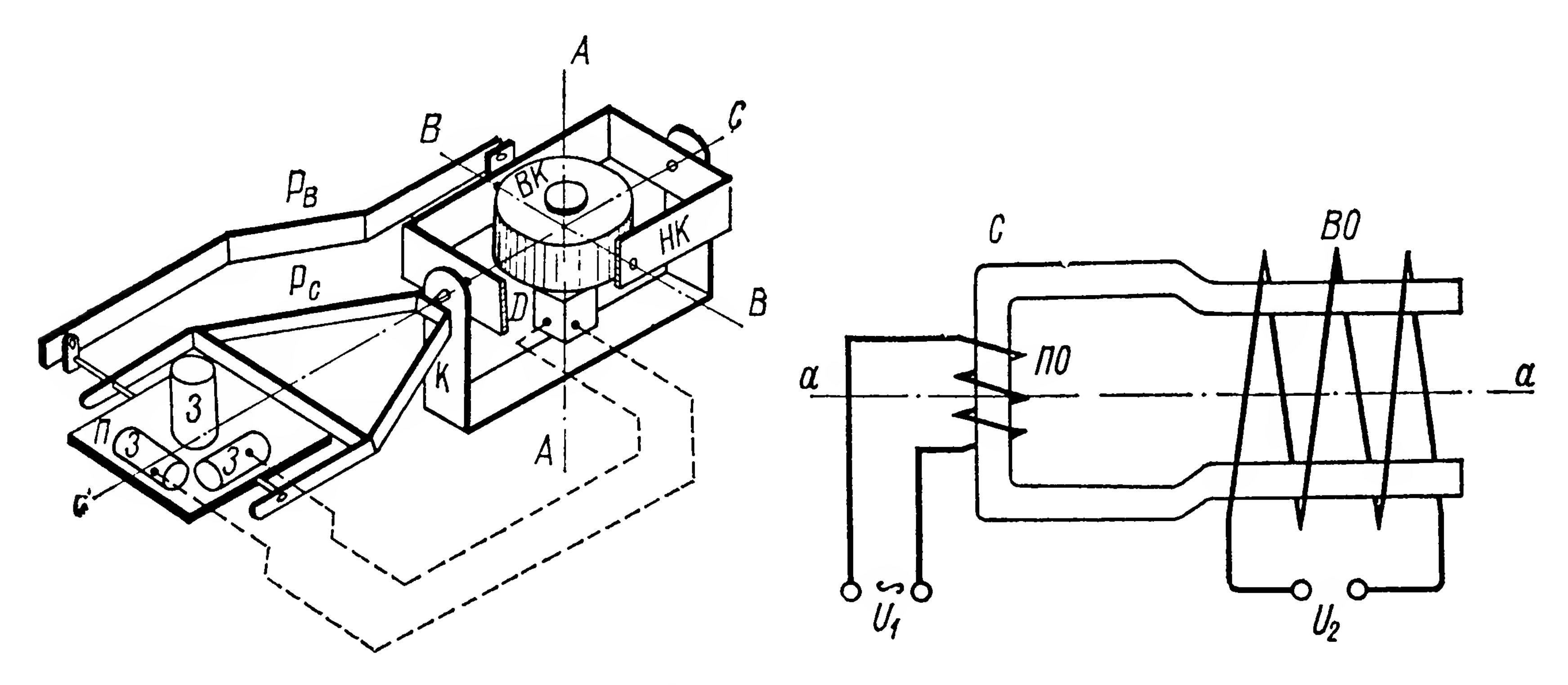



Рис. 112. Гироскопический стабилизатор магнитометра

Рис. 113. Схема феррозонда

которого приведена на рис. 113, представляет собой пермаллоевый сердечник, в центральной части которого расположена первичная электрообмотка *ПО*, питаемая переменным током напряжением $U_1$. На концах сердечника *С* намотана вторичная обмотка *ВО*. Магнитный поток, возбуждаемый первичной обмоткой *ПО*, в каждой половине сердечника *С* имеет противоположные направления. В результате электродвижущая сила в обмотке *ВО* не наводится.

Указанный поток за каждый период изменения направления переменного тока в обмотке *ПО* дважды насыщает обе половины сердечника *С*, изменяя тем самым его магнитную проницаемость. Вследствие этого магнитное поле Земли будет создавать в сердечнике пульсирующий поток, направленный в обеих половинах сердечника одинаково, благодаря чему на вторичной обмотке *ВО* возникает напряжение $U_2$. Последнее будет максимальным при совмещении продольной оси *аа* сердечника *С* с направлением вектора напряженности магнитного поля Земли и равным нулю при их взаимно перпендикулярном положении.

Основной феррозонд, установленный перпендикулярно площадке *П* (см. рис. 112), предназначен для измерения полного

вектора напряженности. Два других дополнительных феррозонда, расположенных перпендикулярно друг другу, а также перпендикулярно основному феррозонду, измеряют составляющие указанного вектора при несовпадении оси основного зонда с полным вектором напряженности магнитного поля Земли.

Наличие электросигналов с дополнительных зондов свидетельствует о том, что ось основного зонда не совмещена с вектором напряженности магнитного поля. Поворачивая площадку *П* относительно горизонта, добиваются отсутствия этих сигналов и, следовательно, совмещения оси основного зонда с вектором напряженности магнитного поля Земли. Такое ориентирование площадки *П* несложно выполнить на неподвижном относительно Земли основании. Но геологические изыскания при таком методе измерений были бы весьма продолжительны, так как потребовалось бы много времени для транспортировки прибора от одной выбранной точки измерения до другой.

Время геологического исследования района можно значительно сократить, установив магнитометр на самолете. При этом однако необходимо обеспечить неизменность перпендикулярного положения площадки *П* по отношению к вектору напряженности магнитного поля Земли. Ее стабилизация и осуществляется с помощью гироскопа, ротор которого вращается вокруг оси *AA* в кольце *ВК*. Последнее монтируется по оси *BB* в наружном *НК* кольце подвеса, которое по оси *CC* устанавливается в корпусе *К* прибора. С помощью рычагов $P_с$ и $P_в$ площадка *П* так связана с наружным *НК* и внутренним *ВК* кольцами гироскопа, что его главная ось *AA* всегда остается параллельной продольной оси основного феррозонда. Снимаемые с дополнительных зондов сигналы поступают на устройство *D*, которое смонтировано на кольце *ВК*. С помощью последнего создают действующие на гироскоп внешние моменты по аналогии с тем, как это было рассмотрено ранее (см. рис. 85). Только теперь управление внешними моментами осуществляется не маятниками, а дополнительными феррозондами.

Как только ось основного зонда отклонится от вектора напряженности магнитного поля Земли, сразу же снимаемые с дополнительных феррозондов сигналы поступят на устройство *D*, которое и создает моменты внешних сил. Под их влиянием у гироскопа возникает прецессия. Его ось *AA*, а следовательно, и ось основного зонда возвращаются к совмещению с вектором напряженности магнитного поля Земли. При наступлении указанного совмещения сигналы, снимаемые с дополнительных зондов, станут равными нулю, и прецессия гироскопа прекратится. Таким образом, мы убедились, что гироскопический стабилизатор обеспечивает совмещение своей главной оси *AA* и продольной оси основного зонда с вектором напряженности магнитного поля Земли. По отклонениям последнего от направления, указанного на магнитных картах, и устанавливают наличие в недрах данного района залежей полезных ископаемых.

## 40. Маркшейдерский гирокомпас

Использование гирокомпаса в горном деле не ограничивается приведенными примерами. Он получает все большее распространение и при маркшейдерских работах, проводимых для согласования направлений подземных разработок с рельефом местности и размещением сооружений на земной поверхности.

Представим себе, что в шахте, разрез которой изображен на рис. 114, на определенной глубине должен быть прорыт коридор в направлении *OA*, составляющий с меридианом *NS* некоторый

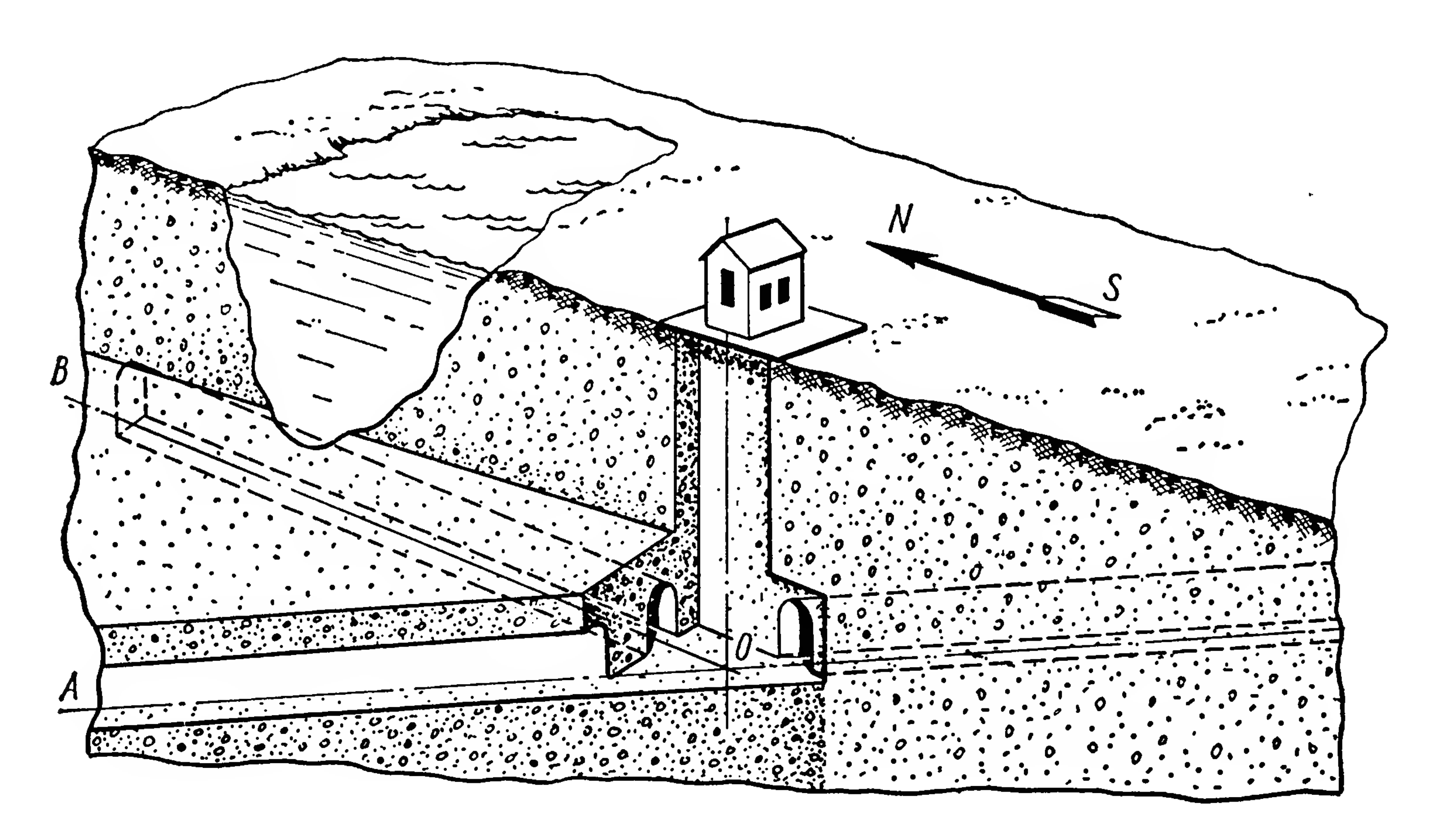



Рис. 114. Схема шахтных подземных разработок

угол. Если в шахте положение плоскости меридиана будет определено неточно, то разработку коридора будут вести не по заданному азимуту *OA*, а по другому направлению *OB*. Такая ошибка может привести не только к непроизводительным затратам, так как коридор в этом случае может пройти вообще мимо пластов, содержащих полезные ископаемые, но подчас и к авариям в шахте. Если в данном районе находится, например озеро, то при производстве выработки в ошибочном направлении *OB* можно настолько близко подойти к его дну, что кровля шахты не выдержит веса воды и разрушится, а вода хлынет в выработку и зальет подземные сооружения шахты. Вот почему к точности определения азимутальных направлений под землей предъявляются исключительно высокие требования.

Долгое время перенос направления *NS* с земной поверхности на дно шахты производился геометрическим способом. На поверхности земли над входным отверстием ствола шахты устанавливался стержень строго в указанном направлении. На концах стержня на максимально возможном удалении друг от друга, ограничиваемом диаметром входного отверстия ствола, закреплялись два проволочных отвеса с тяжелыми грузами на концах.

Отвесы опускались на всю глубину шахты, и на ее дне фиксировались точки касания грузов Соединив их прямой, получали направление меридиана. Точность описанного метода резко снижалась с увеличением глубины шахты. Поэтому в современных условиях, когда шахты опускаются на все большие глубины, геометрический метод не обеспечивает требуемой точности. Кроме того, выполнение описанных операций сопряжено с большими затратами времени, что снижает производительность работ. Указанные недостатки геометрического метода заставили маркшейдеров уже на первом своем Всероссийском съезде в 1913 г. поставить вопрос об использовании для подземного ориентирования гироскопического компаса. Однако осуществление этой идеи стало возможным только при Советской власти.

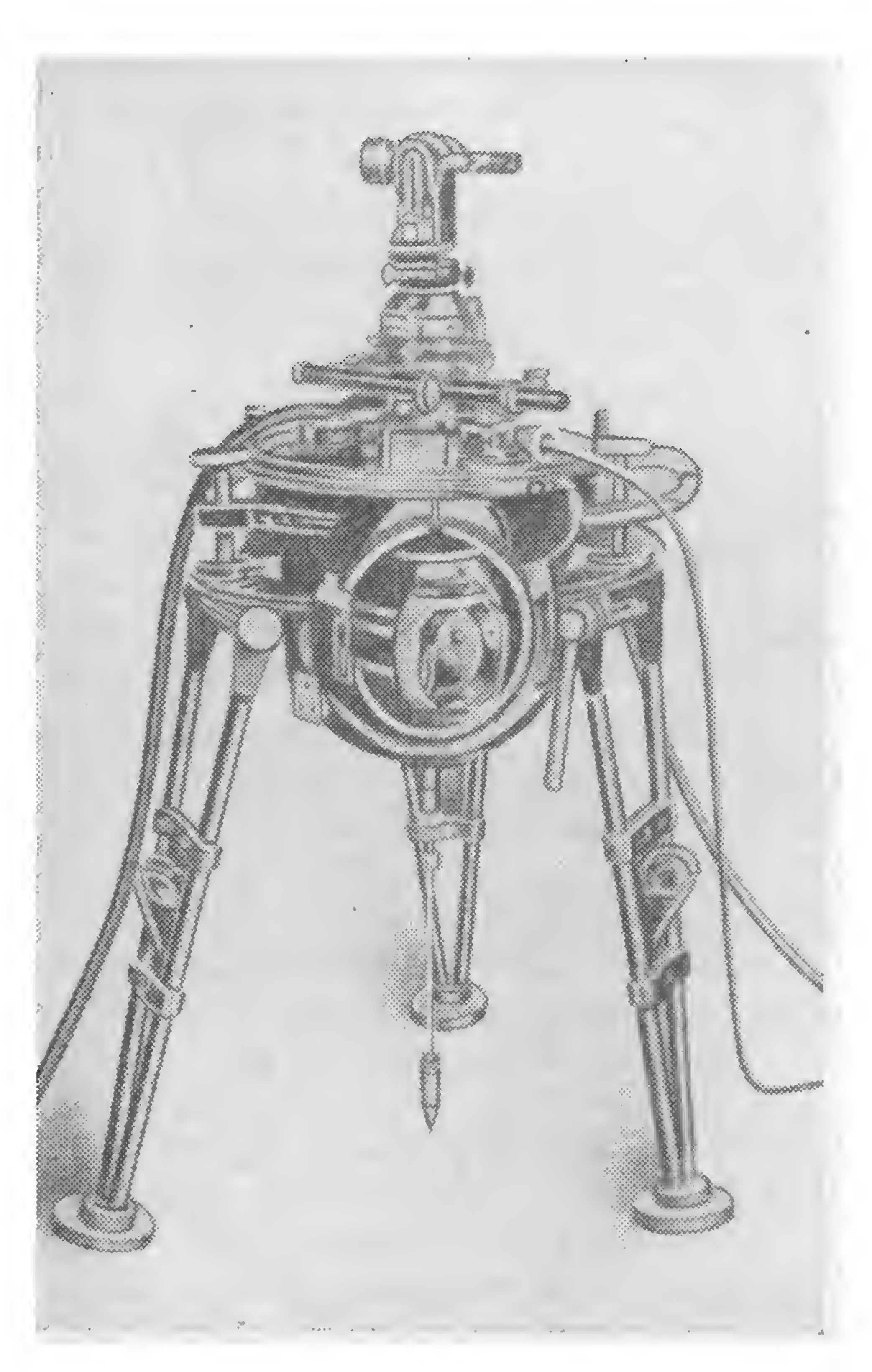
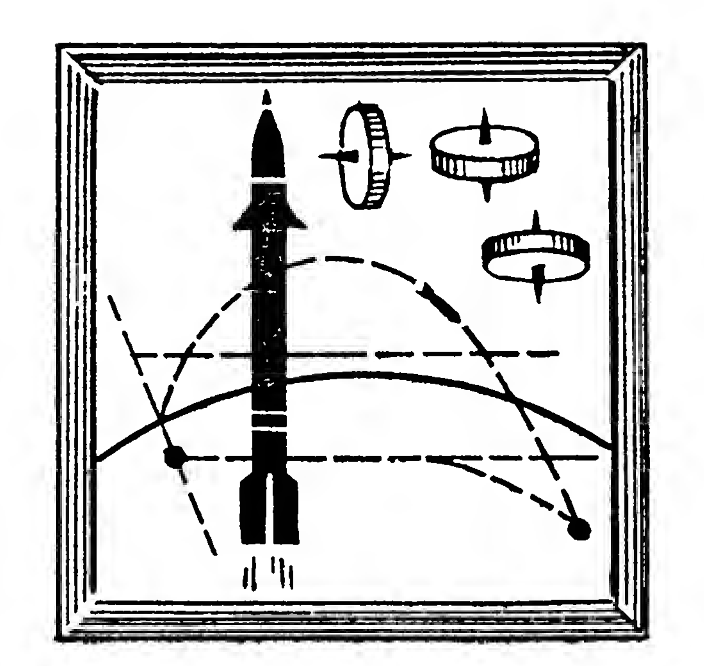


Рис. 115. Маркшейдерский гирокомпас

В маркшейдерском приборе используются оба типа гироскопических компасов: как с тремя, так и с двумя степенями свободы. В обоих случаях прибор должен иметь малые габариты, обеспечивающие удобство его транспортировки. Маркшейдерский компас, показанный на рис. 115, устанавливается обычно на треноге, которая снабжена отвесом для фиксирования на рабочей площадке местоположения точки подвеса гироскопа. Его наружное кольцо имеет шкалу для азимутального определения направления шахтной выработки. Для повышения удобства и точности измерений прибор снабжен оптическим визиром. Такая конструкция маркшейдерского гироскопа удобна в эксплуатации. Ее использование не требует остановки работы в шахте на время определения плоскости географического меридиана.





# VIII

# ГИРОСКОП В ВОЕННОМ ДЕЛЕ

## 41. Увеличение дальности и точности стрельбы

История войн показывает, что враждующие стороны всегда стремились нанести поражение противнику на возможно большем удалении от своих жизненных центров. Еще в глубокой древности стали применять пращу, позволявшую забрасывать

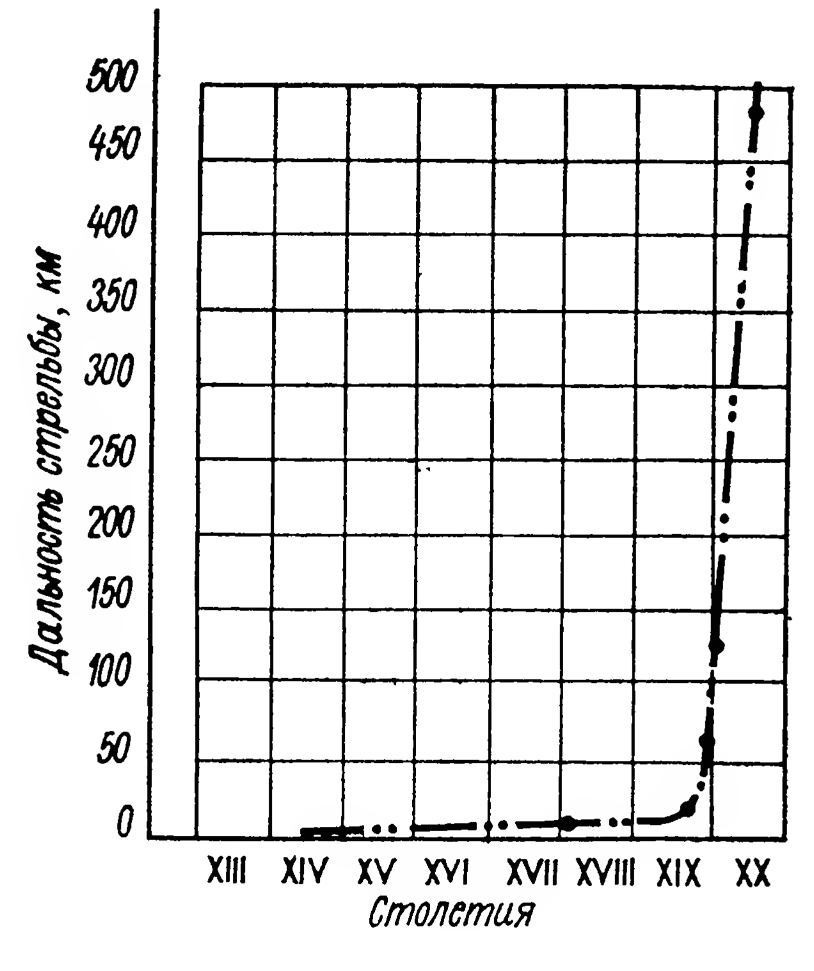




Рис. 116. Диаграмма роста дальности стрельбы

в стан противника камни с расстояния 80—100 м. Затем появились стрелы, копья и дротики, увеличившие дальность поражения до 150 м. Постепенно повышалась и точность попадания снаряда в цель. Позднее были созданы баллисты, катапульты, бриколи и другие метательные машины, позволившие повысить дальность стрельбы до 180—200 м. Появившиеся в XIII в. гладкоствольные огнестрельные орудия — арматы и пищали — увеличили дальность огня до 300 м, а к началу XVIII в. до 600 м. В тот же период были созданы гладкоствольные пушки, дистанция полета снаряда которых составила 1,5 км.

5 Зак 514

В середине XVIII столетия на вооружение были приняты нарезные орудия, резко повысившие точность огня и увеличившие его дальность до 3,5 км. К началу XIX в. последняя достигала семи, а к концу столетия, когда начали появляться стальные орудия, десяти километров.

В начале XX в. наш соотечественник Н. А. Забудский создал дальнобойную пушку, стрелявшую на дистанцию до 60 км. В первую мировую войну появились орудия, дальность огня которых достигала 120 км. А в двадцатых годах текущего столетия была сконструирована советская дальнобойная пушка, обеспечившая дальность стрельбы до 160 км. В период второй мировой войны появилось ракетное оружие, поражавшее цели на расстоянии до 480 км.

Непрерывное совершенствование нового оружия обеспечило достижение такой дальности огня, когда любая точка на земной поверхности может быть поражена ракетным снарядом. При этом отметим, что одно из основных влияний на увеличение дальности стрельбы (рис. 116), а также ее точности имело использование в военном деле гироскопических свойств быстровращающихся тел.

## 42. Артиллерийский снаряд-волчок

В те времена, когда в артиллерии использовались еще гладкоствольные пушки, снаряды вылетали из орудия, обладая, как

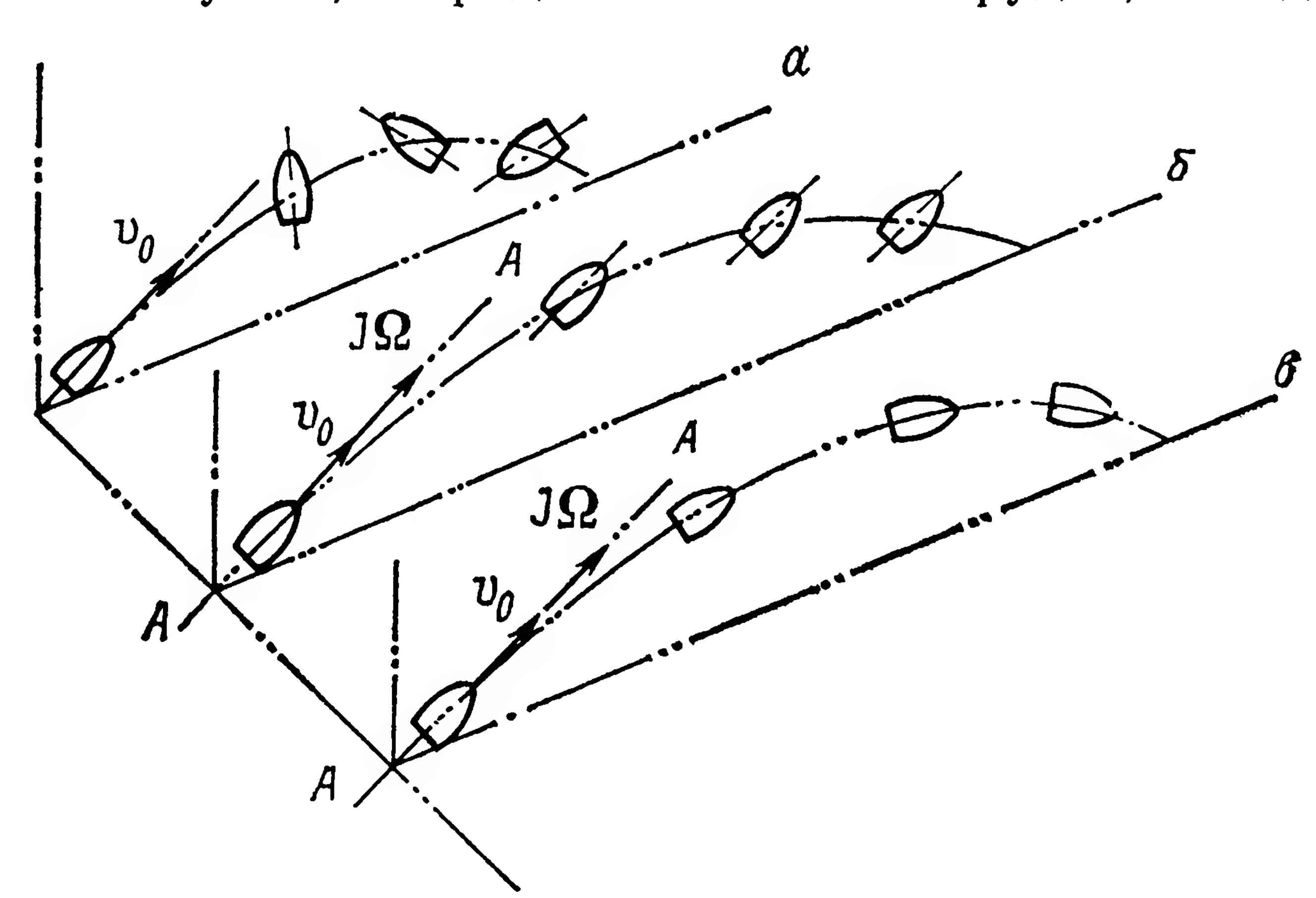



Рис 117. Изменение положения снаряда при полете: *а* — при стрельбе из гладкоствольного орудия; *б* — при стрельбе из нарезного орудия; *в* — полет снаряда-волчка

показано на рис. 117, *а* лишь поступательной скоростью $v_0$. Встречая на своем пути сопротивление воздуха, они принимали произвольные положения относительно горизонта, как бы кувыркаясь в полете. При этом снаряд часто ударялся о цель

своими боковой или донной поверхностями и не разрывался, что снижало результативность стрельбы. Указанные недостатки удалось устранить только с появлением нарезной артиллерии. Благодаря винтовым нарезам в канале ствола снаряду при вылете из орудия сообщалась не только поступательная скорость $v_0$, но и придавалось, как изображено на рис. 117, *б*, вращение вокруг продольной оси $AA$ с угловой скоростью $\Omega$. В результате снаряд, обладавший осевым моментом инерции $I$, развивал относительно оси $AA$ кинетический момент $I\Omega$, превращаясь в своеобразный быстровращающийся волчок.

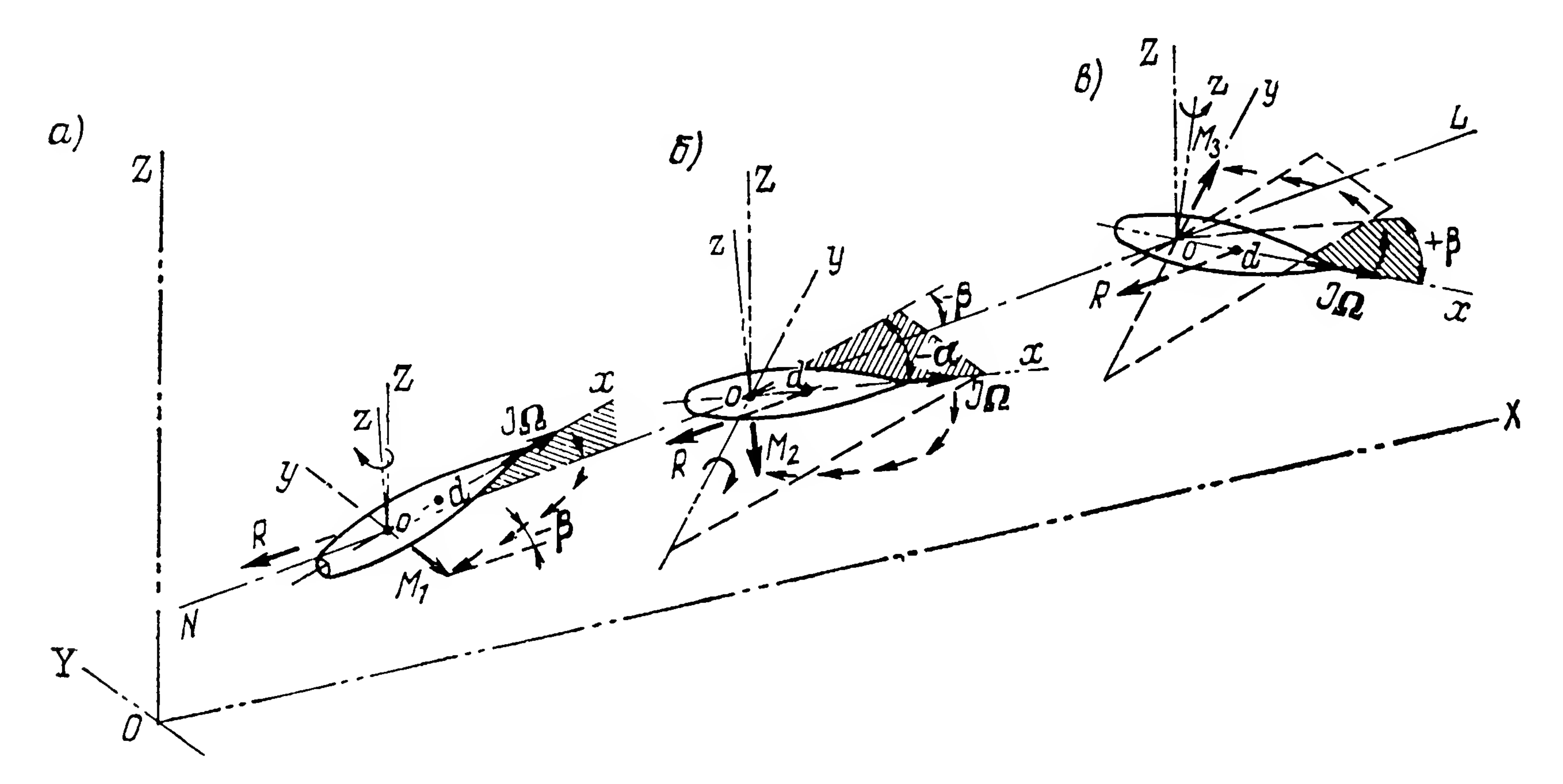



Рис. 118. К объяснению устойчивости полета вращающегося снаряда

Такой снаряд-волчок стремился сохранить в пространстве направление своей главной оси $AA$ неизменным. При движении такого снаряда в космосе его ось $AA$ перемещалась бы строго параллельно самой себе. Но при движении в воздухе он испытывает сопротивление последнего, что и обеспечивает его приземление носовой частью (см. рис. 117, *в*).

Обратимся к рис. 118, *а*, на котором показано, что равнодействующая $R$ сил сопротивления воздушной среды приложена к снаряду в точке $d$, расположенной между его носовой частью и центром тяжести $o$. Поэтому при отклонении оси $ox$ снаряда от направления движения $NL$ сила $R$ создает относительно указанного центра тяжести $o$ момент. Предположим, что ось $ox$ снаряда отклонилась в плоскости $XOZ$ стрельбы от прямой $NL$ на угол $-\beta$. В этом случае сила $R$ создает относительно оси $oy$ момент $M_1$. Под его влиянием снаряд-волчок, подчиняясь закону прецессии, начнет поворачиваться вокруг оси $oz$, стремясь совместить векторы кинетического и внешнего моментов $I\Omega$ и $M_1$ соответственно. Головная часть снаряда будет отклоняться от плоскости стрельбы $XOZ$, и его продольная ось $ox$, как показано на рис. 118, *б*, составит с последней угол $-\alpha$.

Сила $R$ теперь обусловит появление момента $M_2$, стремящегося повернуть снаряд вокруг его оси $oz$ по часовой стрелке. В результате возникнет прецессия снаряда вокруг оси $oy$, а его ось $ox$, как видно из рис. 118, *в*, начнет уходить под плоскость $Loy$, образуя с ней угол $+\beta$. В этом случае сила $R$ будет создавать относительно оси $oy$ момент $M_3$, под влиянием которого вращающийся снаряд получит прецессию вокруг оси $oz$ в направлении против часовой стрелки. Ось $ox$ снаряда будет отклоняться от плоскости $XOZ$ стрельбы. Снаряд теперь будет ориентирован головной частью от читателя.

Описанное перемещение снаряда относительно плоскости стрельбы создает условия, при которых сила $R$ вновь вызовет появление момента, стремящегося повернуть снаряд вокруг оси $oz$ против часовой стрелки. Как следствие, его конусообразные колебания будут повторяться. Они будут происходить вокруг оси $NL$ с весьма малым углом при вершине конуса, обеспечивая устойчивое положение в полете оси $ox$ снаряда. Последняя будет мало отклоняться от касательной $NL$, в силу чего движение снаряда будет происходить все время головной частью вперед. Как видим, превращение снаряда во вращающийся волчок позволило артиллеристам надежно стабилизировать его положение относительно траектории полета и тем самым повысить точность и дальность стрельбы.

## 43. Гироскопические стабилизаторы артиллерийских орудий

Проблема повышения дальности действия вооружения заставила устанавливать орудия на корабли, бронепоезда, самолеты, танки, бронеавтомобили и другие подвижные платформы. Пользуясь ими, воюющие стороны стремились продвинуть орудие как можно ближе к противнику, а в некоторых случаях и в глубину его тыловых коммуникаций.

Во время боя возникала необходимость вести огонь из орудий при движении платформ. В этих условиях вследствие непрерывных колебаний последней резко усложнилась наводка орудий на выбранные цели, что приводило к снижению точности стрельбы.

Дело в том, что, как показано на рис. 119, *а*, для поражения снарядом выбранной цели $A$, отстоящей от орудия на дистанции $D$, ему должен быть придан определенный угол возвышения $\gamma_з$ над горизонтом. Это условие нетрудно выполнить при неподвижной платформе, например при штилевой погоде на море. В этом случае заданный угол $\gamma_з$ может быть придан орудию непосредственно относительно неподвижной палубы корабля. Но при волнении на море, когда корабль, а вместе с ним и орудие изменяют свои положения, произвести выстрел под требуемым углом возвышения довольно сложно. На рисунке показано, что в каждое новое мгновение ось канала ствола ору-

дия занимает относительно горизонта иные положения. Угол возвышения $\gamma$ принимает при этом то бо́льшие (рис. 119, *б*), то меньшие (рис. 119, *в*) значения по сравнению с исходной величиной $\gamma_з$. Чтобы в какой-то мере устранить вредные влияния качки на точность стрельбы, наводчику приходится, работая с механизмами наведения, непрерывно поворачивать орудие относительно палубы в направлении, противоположном ее наклону. Такой метод наведения подвижного орудия требует от наводчика большой затраты энергии, однако процент попадания снарядов в цель остается при этом сравнительно низким.

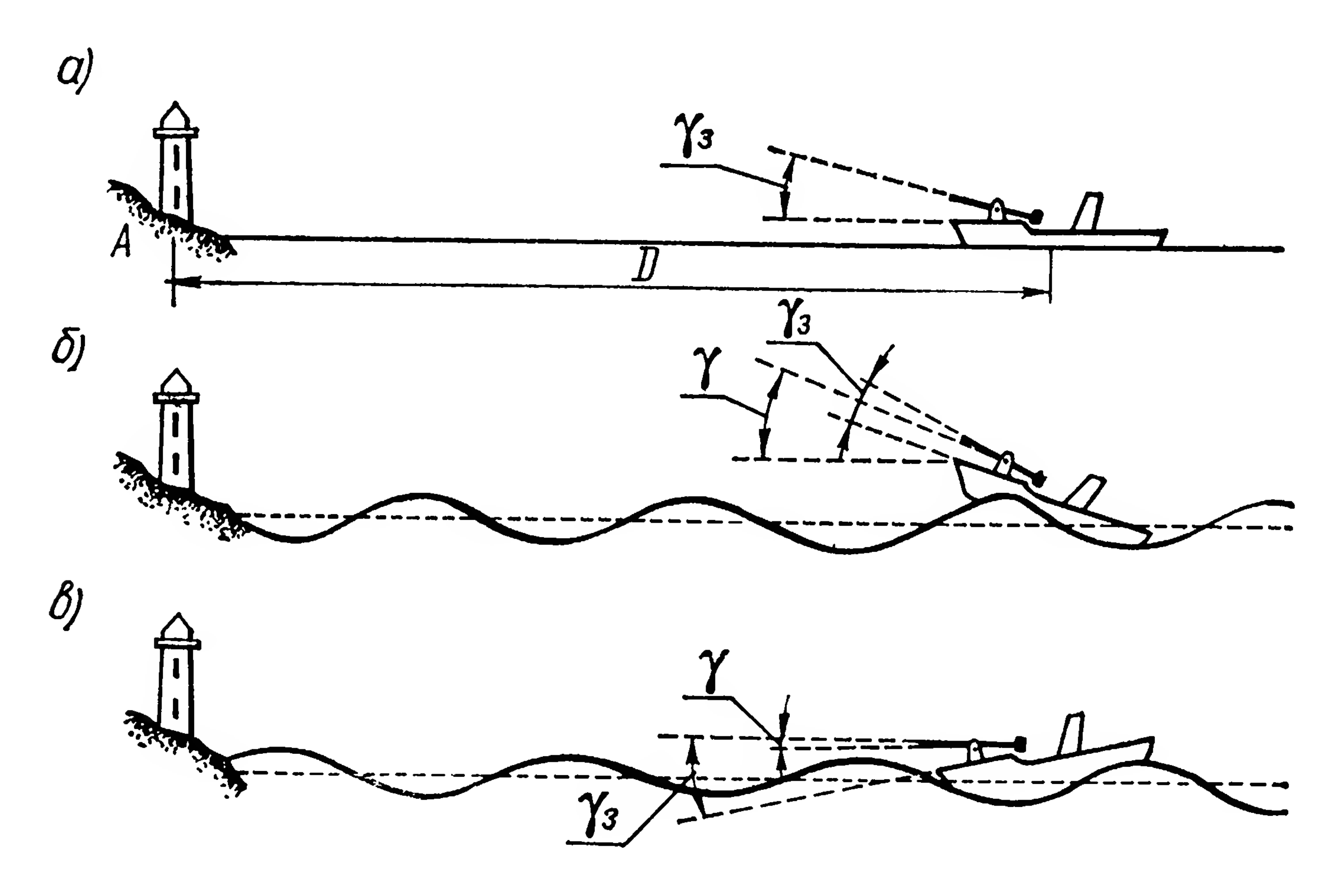



Рис. 119. Ошибки наведения орудия, порождаемые качкой подвижной платформы: *а* — при ровном положении судна; *б* — нос задран на волне; *в* — нос судна зарылся в волну

В XIX в. были сделаны первые попытки использовать гироскопы для удержания орудия в заданном направлении при колебаниях несущей его платформы. Одним из вариантов гироскопического стабилизатора орудия является показанная на рис. 120 отечественная конструкция [39], в которой гироскоп был непосредственно связан с легкой пушкой. Орудие $L$ устанавливалось в опорах на наружном кольце $НК$ и тягой $f$ связывалось с внутренним кольцом $ВК$ гироскопа. При вращении ротора $P$ вокруг оси $AA$ последняя, а вместе с ней и параллельно расположенная ось $DD$ канала ствола орудия оставались стабильными в пространстве и не участвовали в колебательном движении платформы. При наведении орудия на кольцо $ВК$ действовали усилием $F$, создавая прецессию гироскопа и одновременно осуществляя поворот связанного с ним орудия вокруг оси $CC$. Действуя усилием $Q$ на кольцо $НК$, вызывали прецессию гироскопа вокруг оси $BB$ и тем самым поворот орудия вокруг оси $EE$ его цапф.

Несколько видоизмененная модель описанного гиростабилизатора орудия показана на рис. 121. Нетрудно заметить, что для непосредственно стабилизации даже легких орудий нужны мощные гироскопические устройства больших габаритов. С целью

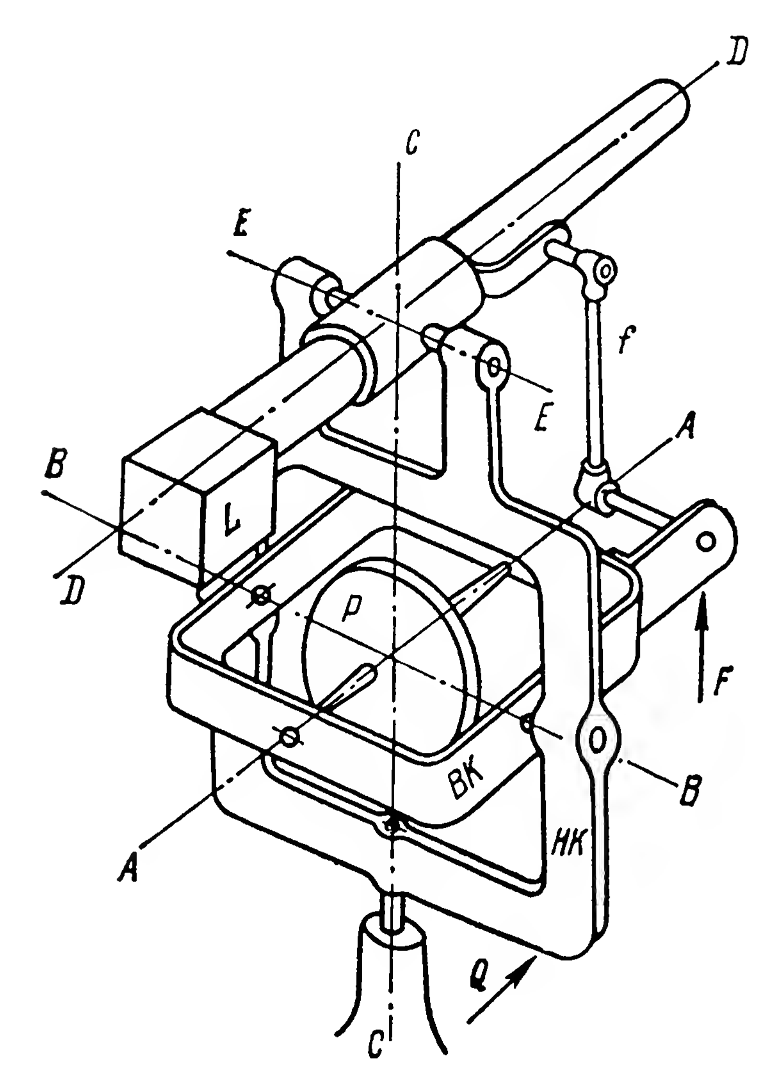



Рис. 120. Гироскопический стабилизатор артиллерийского орудия

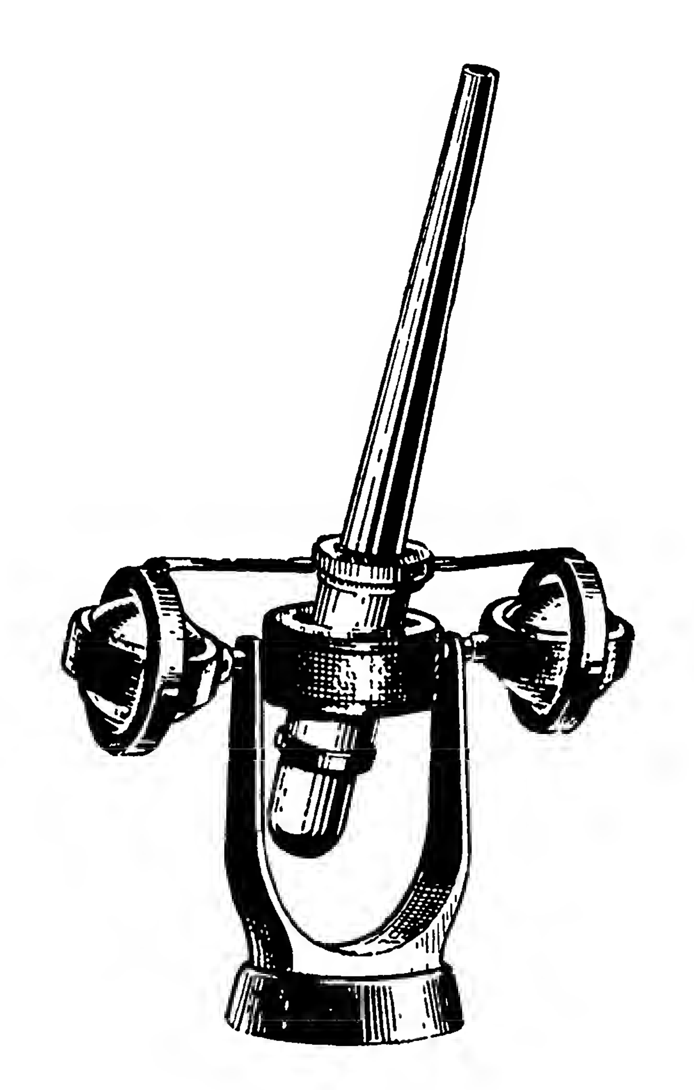


Рис. 121. Модель гироскопического стабилизатора орудия

уменьшения последних на практике стали использовать мощные двигатели, возложив на гироскоп лишь функцию управления последними.

## 44. Гироксопический стабилизатор танковой пушки

Примером использования серводвигателей в системе стабилизации является устройство, удерживающее пушку в неизменном положении относительно плоскости горизонта, которое устанавливалось в годы войны [22] на американских танках. В описываемой системе, иллюстрируемой рис. 122, гироскоп, который собирали в коробке *ГК*, монтировался на маске орудия и служил для измерения отклонений ствола последнего от заданного угла возвышения. При колебаниях танка гироскоп, сохраняя свое положение стабильным, в такт каждому изменению угла корпуса машины относительно горизонта включал электрические контакты, расположенные внутри коробки *ГК*. Тем самым электрический ток подавался в золотниковый распределитель *ЗР* масляного насоса *МН*. В результате по одной из трубок *СТ* открывался доступ масла в поршневой двигатель *ПД*, шток *Ш* которого был соединен с орудием. Поступавшее в двигатель *ПД*

масло заставляло перемещаться его поршень. В результате осуществлялся поворот орудия вокруг оси *ОО* цапф в направлении, противоположном наклону танка, чем и обеспечивалась стабилизация ствола пушки на заданном угле возвнышения.

Для повышения точности стабилизации устройство, как показано на рис. 123, снабжалось двумя гироскопами. Гироскоп $Г_1$ имел три степени свободы и нес на наружном кольце *НК*, выполнявшемся в виде крестовины, управляющие электрические контакты *ЭК*. При отклонении орудия от заданного направления

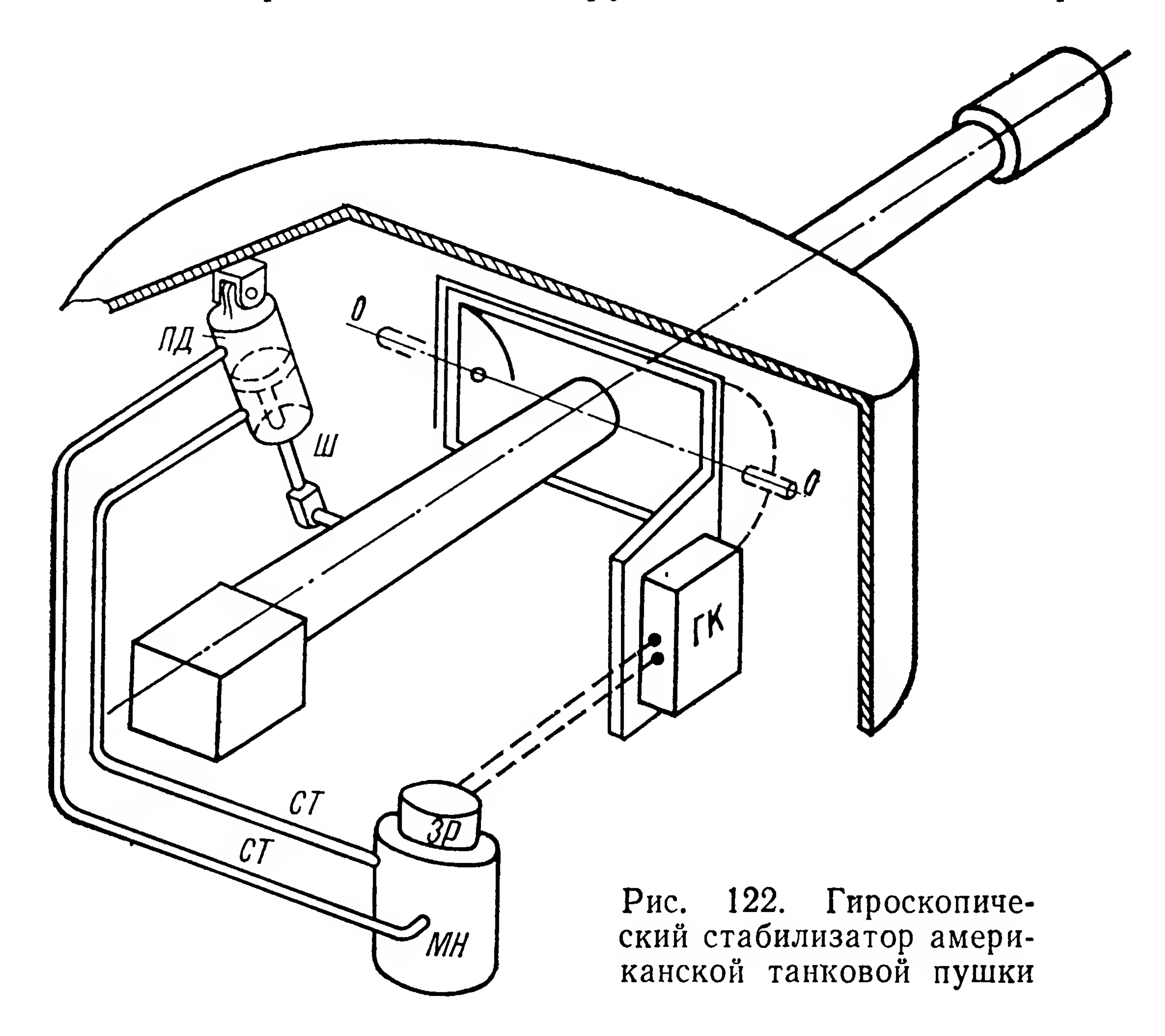



Рис. 122. Гироскопический стабилизатор американской танковой пушки

гироскоп $Г_1$, сохранявший свою ось в пространстве стабильной, поворачивался относительно корпуса *ГК* и перемещал пластинчатые контакты *ЭК* относительно рычага *Р*. С ростом угла отклонения орудия от заданного направления угол поворота гироскопа $Г_1$ в корпусе *ГК* увеличивался и количество пластин *ЭК*, включаемых в электрическую цепь рычагом *Р*, возрастало. Тем самым обеспечивалось возрастание силы тока, подаваемого на золотниковый распределитель *ЗР* масляного насоса *МН* (см. рис. 122). В результате масло из насоса подавалось в стабилизирующий двигатель *ПД* в большем количестве, что и обеспечивало поворот орудия вокруг оси *ОО* с более высокой скоростью. Рычаг *Р* (см. рис. 123) укреплялся на камере двухстепенного гироскопа $Г_2$, который удерживался в среднем положении относительно основания *ГК* пружиной *П* по аналогии с конструкцией гиротахометра (см. рис. 78). При повороте орудия относительно плоскости горизонта гироскоп $Г_2$ поворачивался вокруг

оси подвеса $BB$ и смещал рычаг $P$ с нулевого положения. Управляющие контакты $ЭК$ подавали при этом ток в золотниковый распределитель $ЗР$, что и обеспечивало действие двигателя $ПД$ на орудие уже в самом начале возникновения отклонения. Гироскоп $Г_2$ как бы предупреждал отклонение орудия от заданного направления, повышая тем самым точность стабилизации.

В Советском Союзе еще в 1933 г. впервые в мире была создана система гироскопической стабилизации линии прицеливания танкового вооружения [23]. Пользуясь указанной системой

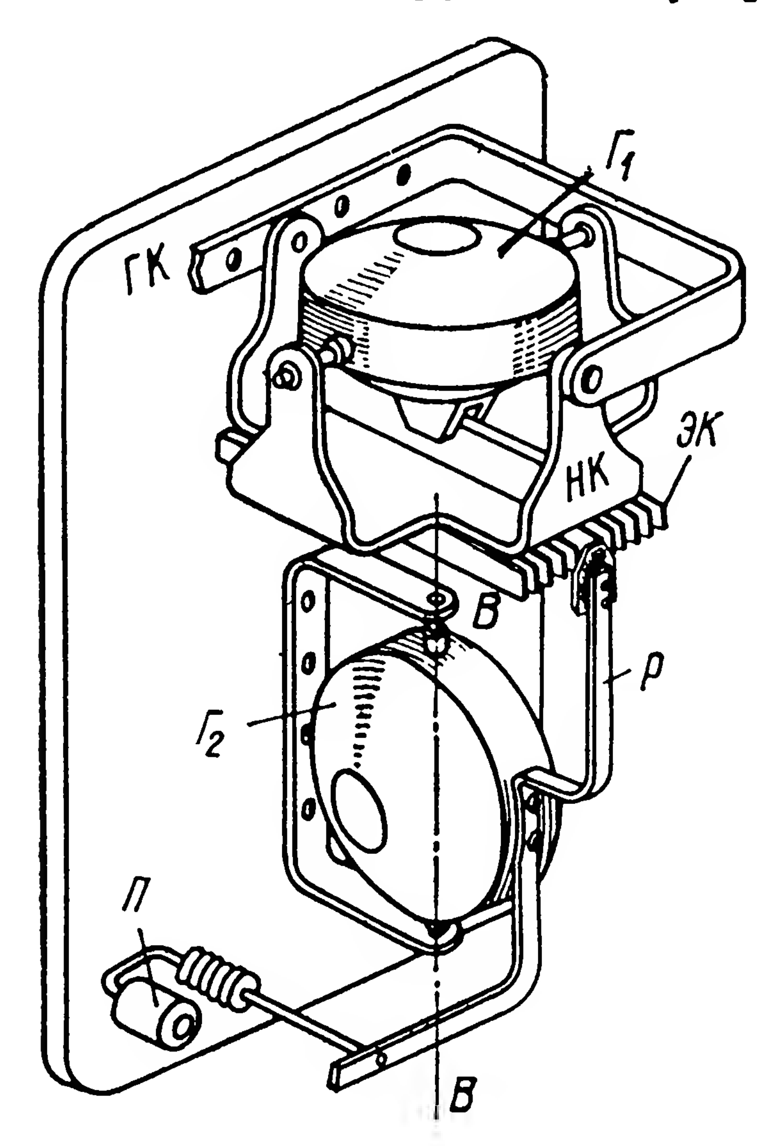



Рис. 123. Гироскопический узел стабилизатора американской танковой пушки

удалось значительно повысить эффективность стрельбы из орудий и пулеметов движущихся танков. При этом габариты стабилизатора были весьма малы и не стесняли работу их экипажей.

## 45. Танковый гирокомпас

Для обеспечения попадания в цель орудию кроме заданного угла возвышения должно быть сообщено и направление относительно плоскости меридиана, или, как говорят, азимут. Если цель наводчику видна, то это требование выполняется при непосредственном наведении на нее орудия. В тех же случаях когда видимость отсутствует, для наведения орудия в азимуте приходится пользоваться приборами.

Морские артиллеристы для решения этой задачи давно использовали гироскопический компас. Сложнее было танкистам, которые из-за малого объема боевого помещения танка не могли воспользоваться для этой цели морским гирокомпасом, обладаю-

щим, как известно, достаточно большими габаритами (см. рис. 68). Поэтому вначале для азимутального ориентирования танков пытались использовать магнитный компас, но по причинам сильного влияния на точность его работы железных масс от этой идеи пришлось отказаться. Последнее обстоятельство заставило работать над проектированием малогабаритного гирокомпаса, который и был создан в тридцатые годы текущего столетия. Малые размеры позволили разместить компас внутри

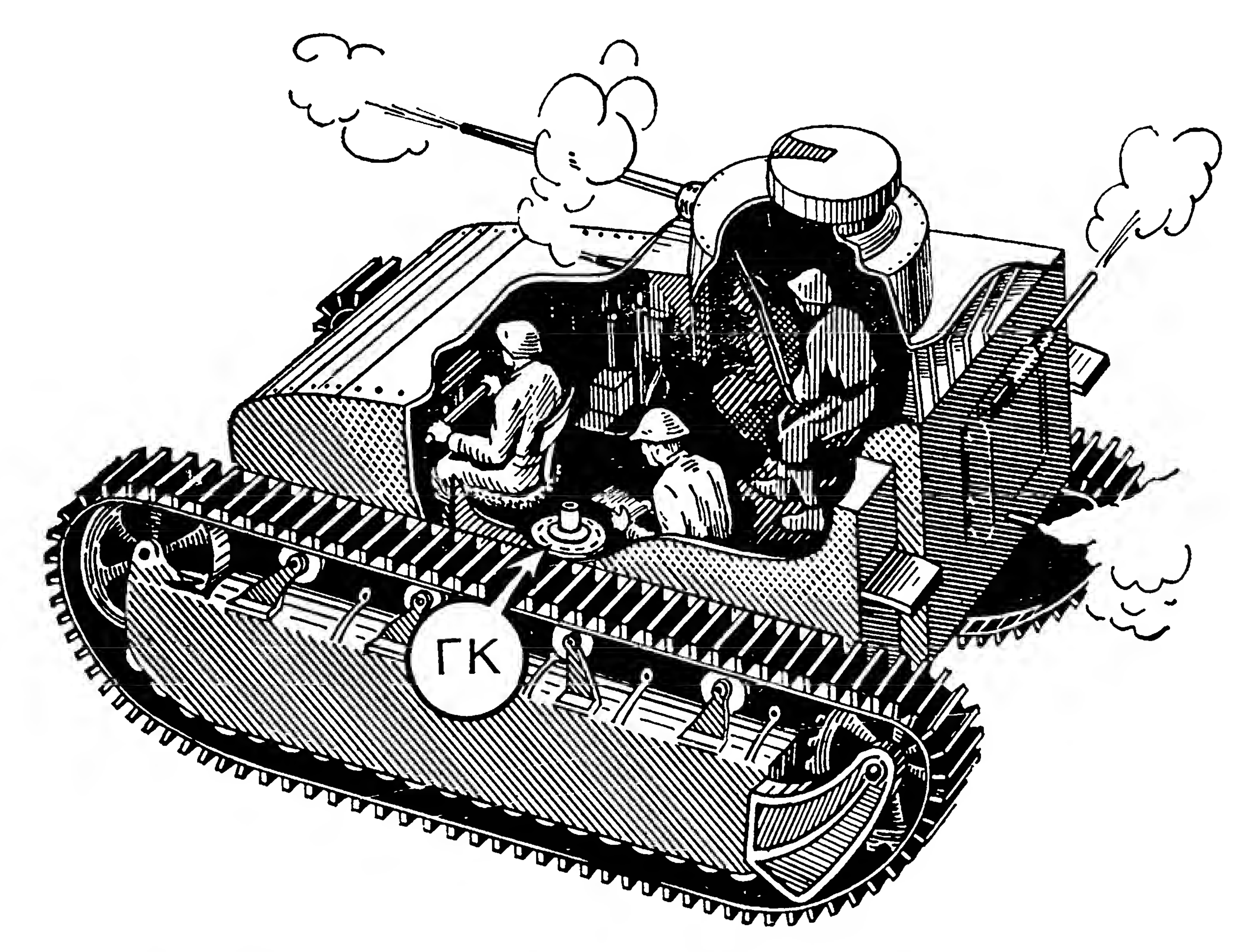



Рис. 124. Установка гирокомпаса на американском танке Т-2

боевого помещения танка, что и подтверждает рис. 124. Его стали использовать как для вождения танка, так и для стабилизации положения орудия в азимуте.

## 46. Гироскопический стабилизатор морской торпеды

Для поражения противника на большом удалении моряки еще в начале XIX в. стали применять подводные самодвижущиеся снаряды, известные как торпеды. После выстрела такой снаряд пролетал некоторое расстояние по воздуху, а затем погружался в воду. С этого момента его движение обеспечивалось установленным внутри торпеды пневматическим двигателем, вращающим гребные винты, расположенные в хвостовой части. Гиростабилизатор морской торпеды изображен на рис. 125.

Для обеспечения движения в заданном направлении торпеда снабжена четырьмя рулями управления. Два горизонтальных

руля *РГ* удерживают торпеду на заданной глубине, а вертикальные *РН* — в выбранном направлении по курсу. Перемещениями двух последних рулей управляет гироскоп направления *ГН*, наружное кольцо которого связано со штоком золотника *З*. При отклонении торпеды от заданного курса гироскоп *ГН*, сохраняя неизменным свое положение в пространстве, переместит шток золотника *З* и тем самым откроет доступ сжатому воздуху в цилиндр рулевой машинки *РМ* с той или иной стороны от ее поршня.

Под действием сжатого воздуха последний переместится внутри цилиндра машинки и повернет на некоторый угол рычаг *Д* и связанные с ним рули направления *РН*. Поворот этих рулей

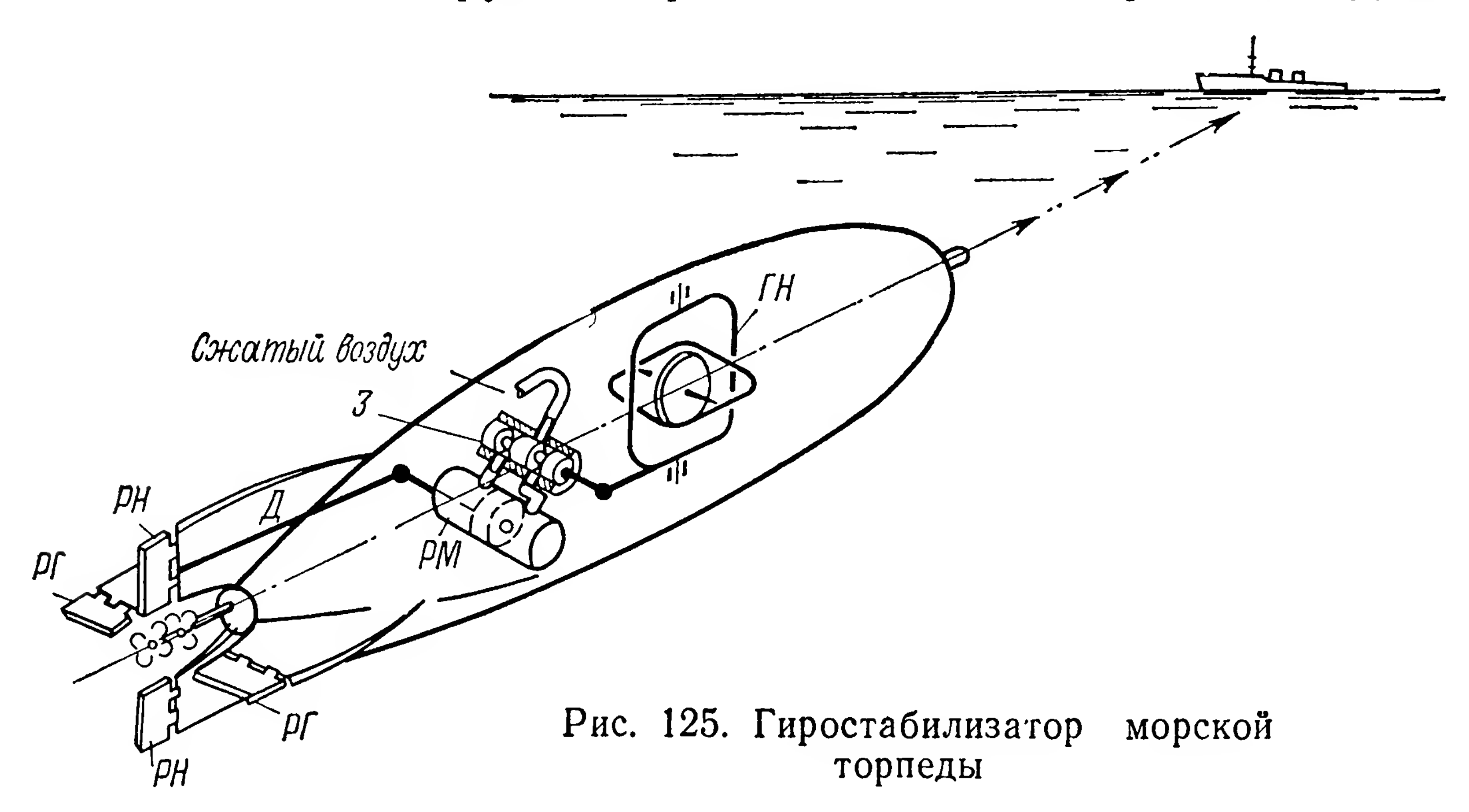



Рис. 125. Гиростабилизатор морской торпеды

приведет к возвращению торпеды на заданный курс, причем чем ближе подойдет она к выбранному в момент выстрела направлению, тем меньше будет угол перекладки рулей. При совмещении продольной оси торпеды с заданным курсом рули управления займут исходное нейтральное положение и она будет двигаться в требуемом направлении.

## 47. Гироскопические приборы, управляющие полетом самолета-снаряда

Дальнейшее увеличение дальности стрельбы было достигнуто с помощью появившегося в конце второй мировой войны нового вида оружия — беспилотных автоматически управляемых самолетов-снарядов. Первые образцы нового оружия походили на самолеты, управляемые автопилотами (см. рис. 89). Позже крыльям самолета-снаряда стали придавать стреловидную форму с уменьшенной опорной площадью, а корпусу летательного аппарата — сигарообразную форму, благодаря чему современные реактивные снаряды приобрели специфические контуры, показанные на рис. 126.

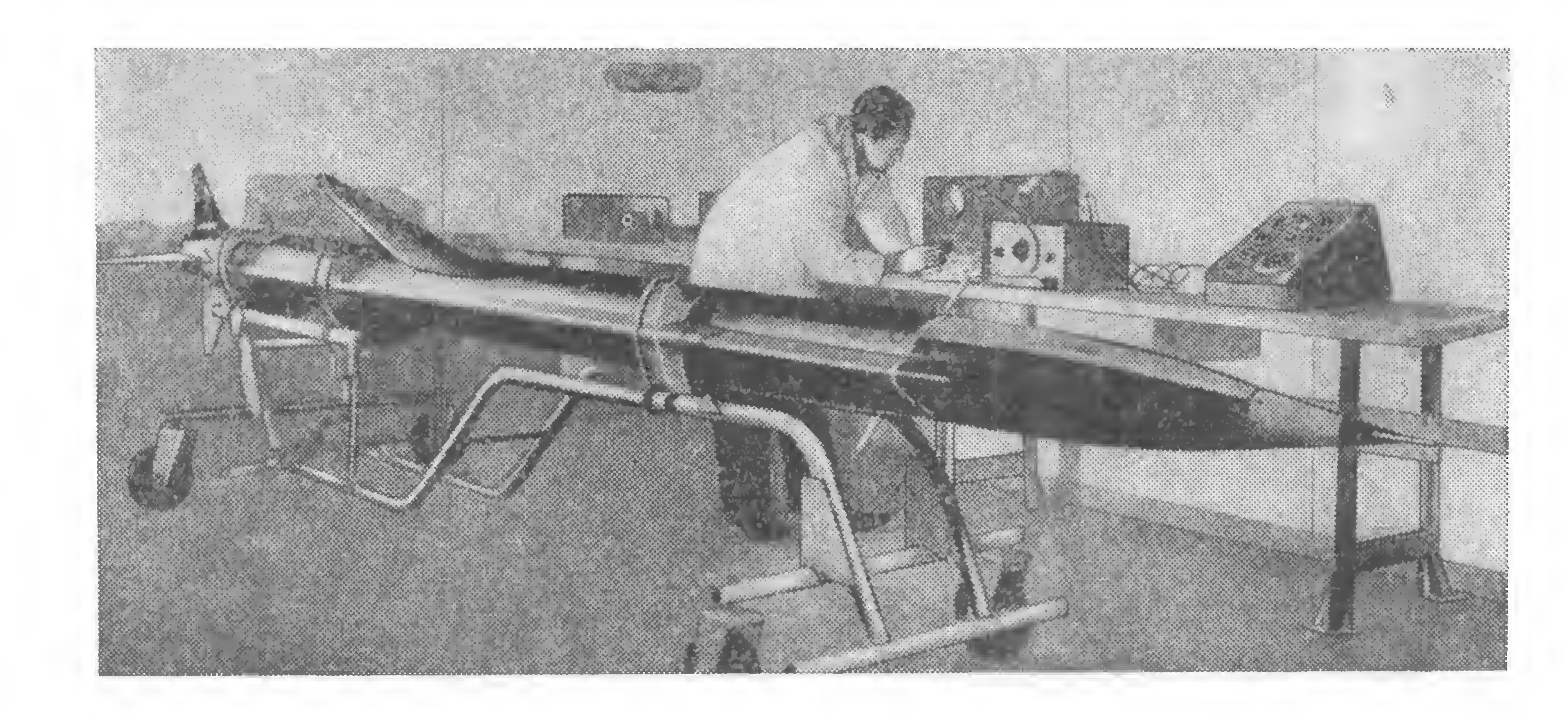


Рис. 126. Американский самолет-снаряд

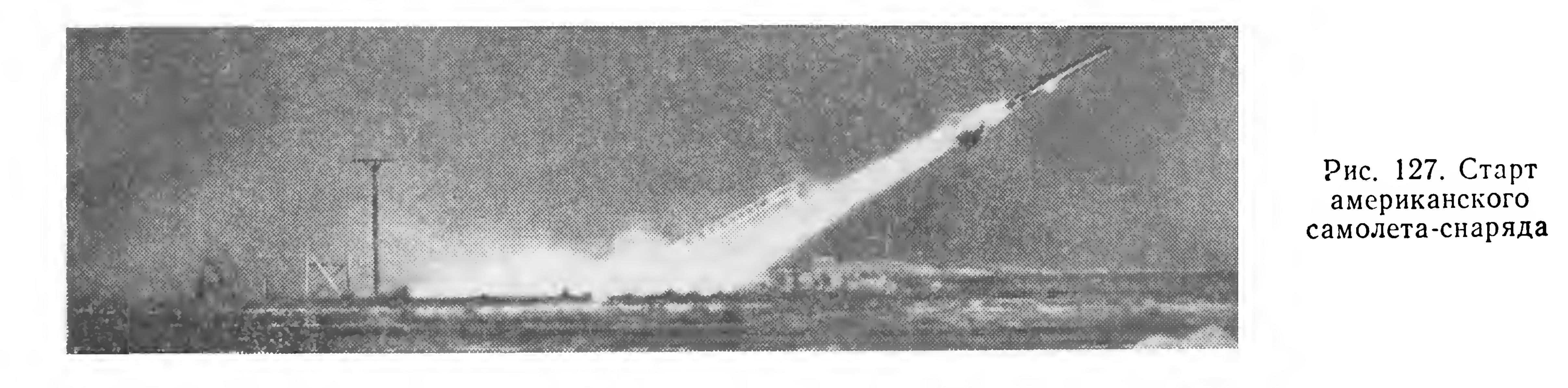


Рис. 127. Старт американского самолета-снаряда

Самолеты-снаряды запускаются, как правило, с наклонной пусковой установки, изображенной на рис. 127, а их движение осуществляется за счет энергии, обеспечиваемой реактивными двигателями. Управление полетом с момента подъема снаряда в воздух до достижения им цели осуществляется гироскопическим автопилотом. Рассмотрим принцип его работы, представленный на рис. 128, на примере немецкого управляемого самолета-снаряда «Фау-I».

Основным элементом автопилота является гироскоп $Г_1$ с тремя степенями свободы. Для того чтобы он мог реагировать на повороты снаряда вокруг осей $o_c y_c$, $o_c z_c$, а частично и $o_c x_c$, оси $CC$ и $AA$ подвеса гироскопа должны быть ориентированы: первая параллельно оси $o_c y_c$, а вторая — под углом $\nu$ 12—15° к плоскости $x_c o_c y_c$ летательного аппарата. При отклонении самолета от плоскости горизонта в результате поворота вокруг оси $o_c y_c$ гироскоп $Г_1$, сохраняя неизменным положение в пространстве, производит поворот струйной трубки $T_1$ вокруг оси $aa$, параллельной оси $CC$ подвеса гироскопа. Трубка $T_1$, в которую под давлением нагнетается сжатый воздух, выйдет из нейтрального положения относительно приемника $П_1$. Сжатый воздух начнет поступать только в один из двух заборных каналов приемника, создавая разность давлений в полостях пневматического реле $ПР_1$. Под влиянием избыточного давления в одной из полостей последнего его мембрана прогнется и переместит золотник $З_1$ рулевой машинки $PM_1$. Сжатый воздух, поступая теперь в рабочий цилиндр машинки, вызовет перемещение в нем поршня. Произойдет поворот вокруг оси $CC$ руля высоты, чем и обеспечивается возврат снаряда в горизонтальное положение.

Для повышения точности стабилизации самолета-снаряда автопилот снабжен гироскопическим тахометром $Г_2$, принцип действия которого был рассмотрен ранее (см. рис. 78). Реагируя на изменения угловой скорости поворота снаряда вокруг оси $o_c y_c$, гироскоп $Г_2$ будет перемещать струйную трубку $T_2$ относительно приемника $П_2$, также связанного с пневмореле $ПР_1$. Гироскоп $Г_2$ быстрее реагирует на повороты самолета вокруг оси $o_c y_c$, поэтому он будет упреждать воздействие на рули высоты $PB$ гироскопа $Г_1$, что уменьшит отклонение снаряда от горизонта.

Для стабилизации летательного аппарата на заданной высоте имеется измеритель высоты $ИВ$. Он состоит из гофрированной мембранной коробки, из которой откачан воздух. Поэтому на разных высотах в связи с неодинаковостью атмосферного давления мембранная коробка будет деформироваться на различную величину. Устанавливая нулевое положение золотника $З$ по давлению на заданной высоте полета, получают возможность измерять отклонение от нее летящего снаряда. Мембранная коробка высотомера $ИВ$, связанный с нею золотник $З$ и пневмодвигатель $СД$ укреплены на основании прибора $ОП$. Шток двигателя $СД$ посредством рычага $r$ связан с корпусом $К$ гироскопа $Г_1$.

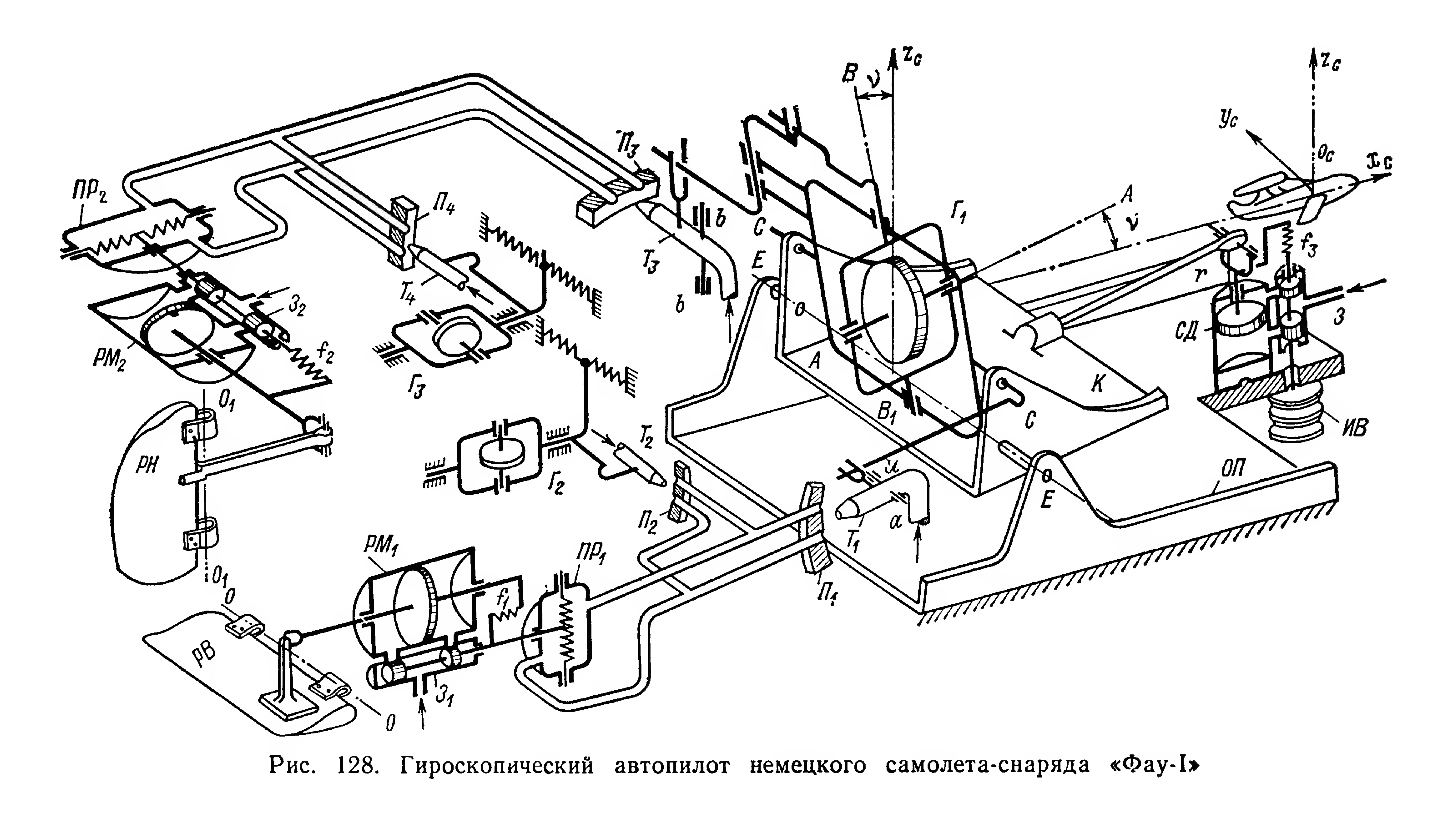



Рис. 128. Гироскопический автопилот немецкого самолета-снаряда «Фау-I»

При отклонении снаряда от заданной высоты полета изменяется атмосферное давление, а следовательно, и величина деформации мембранной коробки, в результате чего происходит перемещение штока золотника *З*. Рабочий поршень изменит положение цилиндра серводвигателя *СД* и посредством рычага *r* повернет корпус *К* гироскопа $Г_1$.

Вместе с корпусом *К* совершит поворот вокруг оси *ЕЕ* и жестко связанный с ним приемник $П_1$, в то время как сам гироскоп и струйная трубка $T_1$ сохранят свое положение неизменным. Сжатый воздух, подаваемый через трубку $T_1$, начнет поступать опять только в одно заборное отверстие, создавая разность давлений в полостях пневмореле $ПР_1$. Это вызовет поворот руля высоты *РВ* вокруг оси *ОО*. Правильный выбор направления поворота последнего обусловит возвращение снаряда к заданной высоте полета. При ее достижении измеритель *ИВ* приведет золотник *З* и корпус *К* гироскопа $Г_1$ в нейтральное положение, обеспечивая продолжение полета на заданной высоте.

Для обеспечения возможности полета по требуемому курсу внутреннее кольцо гироскопа $Г_1$ при помощи системы рычагов связано со струйной трубкой $T_3$. При отклонении летательного аппарата от заданного курса гироскоп $Г_1$, сохраняя свое положение неизменным, вызовет поворот трубки $T_3$ вокруг оси *bb*, смещая ее с нейтрали по отношению к приемнику $П_3$. В полостях пневмореле $ПР_2$ при этом возникнет разность давлений, что вызовет перемещение поршня рулевой машинки $РМ_2$ и необходимый поворот вокруг оси $O_1O_1$ связанного с ним руля направления *РН*.

Для повышения точности стабилизации снаряда на курсе в автопилоте использован еще один гиротахометр $Г_3$, измеряющий угловую скорость поворота летательного аппарата вокруг оси $o_cz_c$, а главная ось гироскопа $Г_1$ корректируется по магнитному компасу. Благодаря размещению оси *ВВ* гироскопа $Г_1$ под углом $\nu$ к оси $o_cz_c$ самолета этот гироскоп позволяет регистрировать не только курс, но и крен самолета, возникающий при его повороте вокруг оси $o_cx_c$. При этом струйная трубка $T_3$, поворачиваясь вокруг оси *bb*, отклоняется от нейтрали приемника $П_3$ и вызывает поворот руля направления *РН* вокруг оси $O_1O_1$ на угол, необходимый для устранения появившегося крена.

Между штоками рулевых машинок и их золотниками установлены пружины $f_1$, $f_2$ и $f_3$, благодаря которым подача сжатого воздуха в цилиндры серводвигателей прекращается раньше возврата летательного аппарата на заданное направление движения. Такое устройство позволяет осуществить более точное обеспечение заданного режима полета самолета-снаряда.

## 48. Гироскопические приборы, управляющие полетом баллистической ракеты

В отличие от самолета-снаряда баллистическая ракета, как показано на рис. 129, стартует строго вертикально. На началь-

ном участке полета *ca*, согласно рис. 130, она движется прямолинейно вверх в направлении *cz*. Достигнув в точке *a* менее плотных слоев атмосферы, ракета начинает поворачиваться. Ее траектория образует наклон к плоскости горизонта. В точке *b* траектории, в которой скорость ракеты должна достигнуть заданного максимального значения, угол наклона ее корпуса

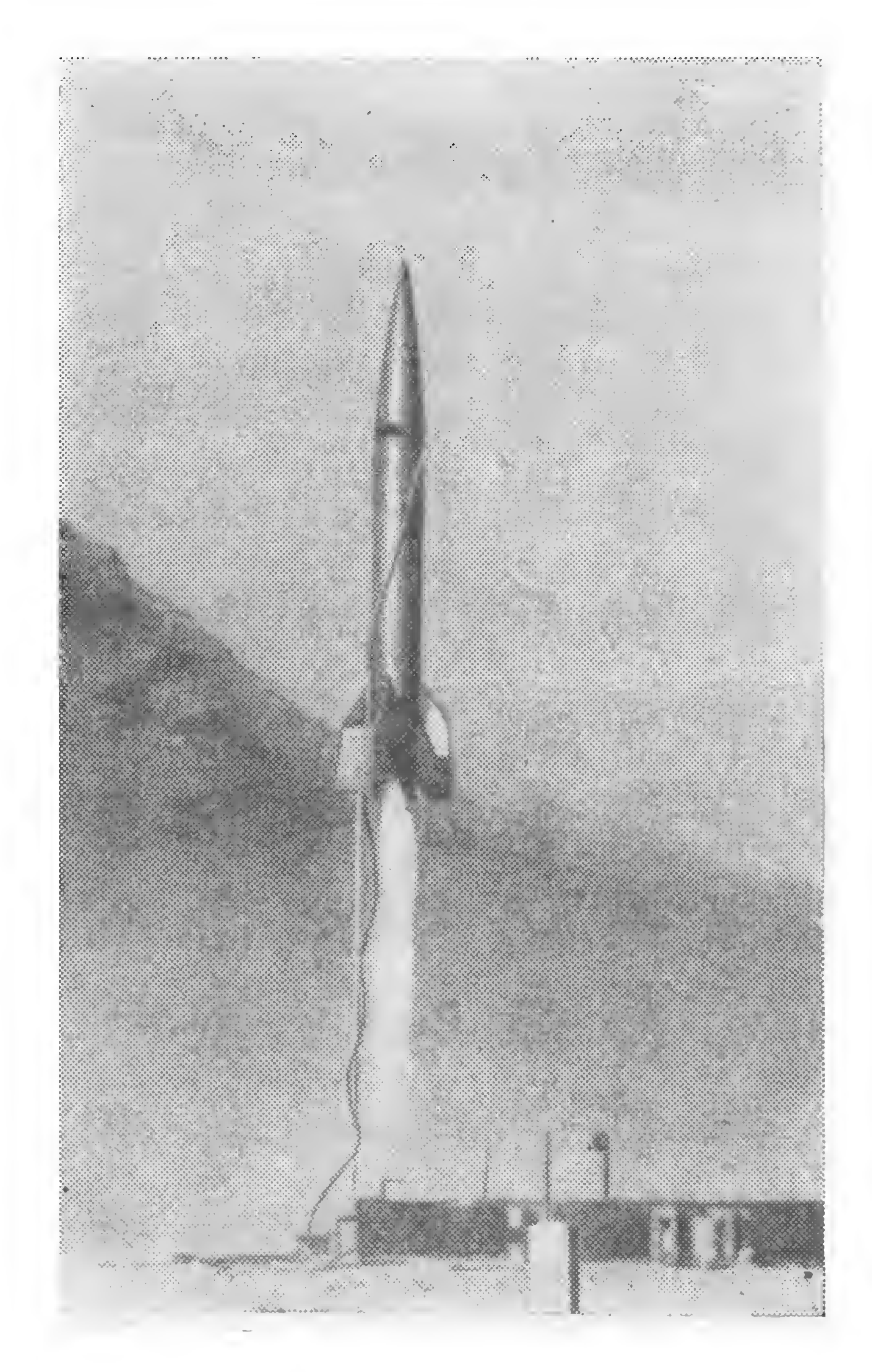


Рис. 129. Старт американской баллистической ракеты

к горизонту становится приблизительно равным 45°. В этот момент ракета входит в разреженные слои атмосферы, работа ее двигателя прекращается, и дальнейший полет происходит по законам движения тела, брошенного под углом к горизонту.

Выполнение программы полета баллистической ракеты осуществляется с помощью трех гироскопов, что и иллюстрирует рис. 131. Первый из них $\Gamma_1$, называемый вертикантом, предназначен для определения углов отклонения ракеты от заданного направления движения по курсу и крену. Второй гироскоп $\Gamma_2$, получивший название горизонт, служит для выполнения поворота ракеты относительно плоскости горизонта. Третий

гироскоп $Г_3$, называемый **гироинтегратором**, предназначен для обеспечения выключения двигателя в момент достижения ракетой заданной максимальной скорости.

При отклонении ракеты от заданного курса или при ее повороте вокруг оси $o_c z_c$ гироскоп $Г_1$, сохраняя свое положение в

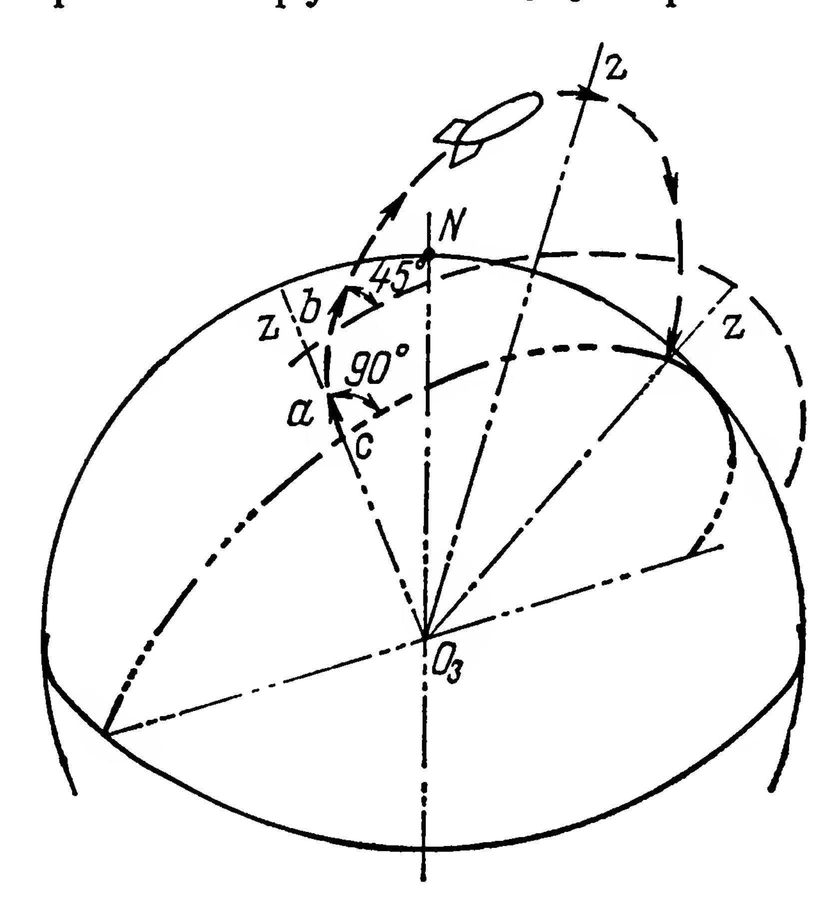



Рис. 130. Траектория полета баллистической ракеты

пространстве, переместит движок потенциометра $П_1$. Снимаемый с последнего электрический ток подается на рулевую машинку, которая, поворачивая рули управления, возвращает ракету на заданный курс. Снимаемый с потенциометра $П_2$ электрический

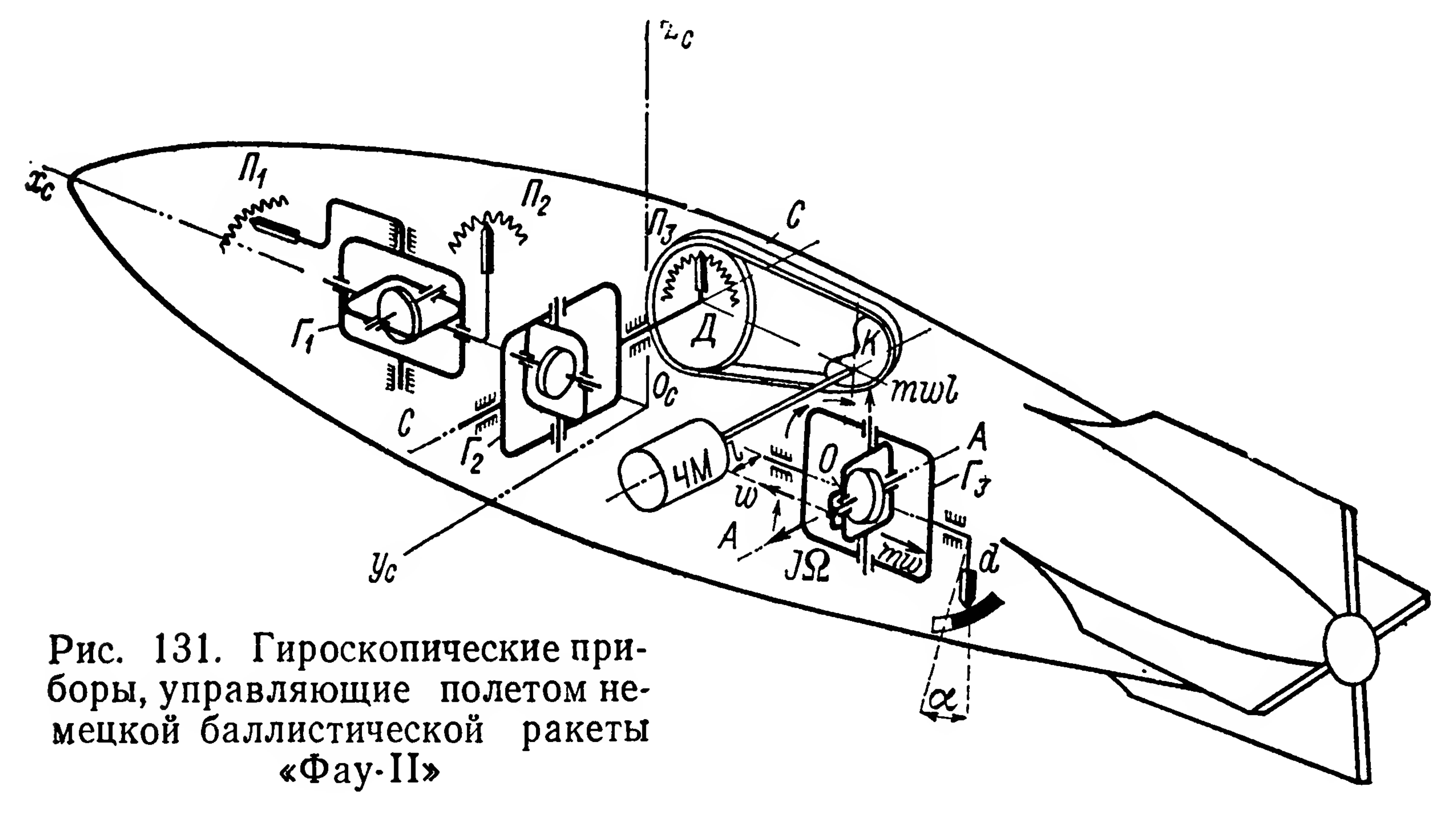



Рис. 131. Гироскопические приборы, управляющие полетом немецкой баллистической ракеты «Фау-II»

сигнал, пропорциональный углу крена аппарата, поступив в автопилот, вызывает с помощью рулевой машинки такую ориентацию рулей управления, которая приведет к устранению возникшего крена. Отклонение ракеты от заданного горизонтального положения фиксируется гироскопом $Г_2$. Снимаемый с его потенциометра $П_3$ сигнал, пропорциональный углу поворота ракеты вокруг оси $o_c y_c$, подается на рулевую машинку, которая путем

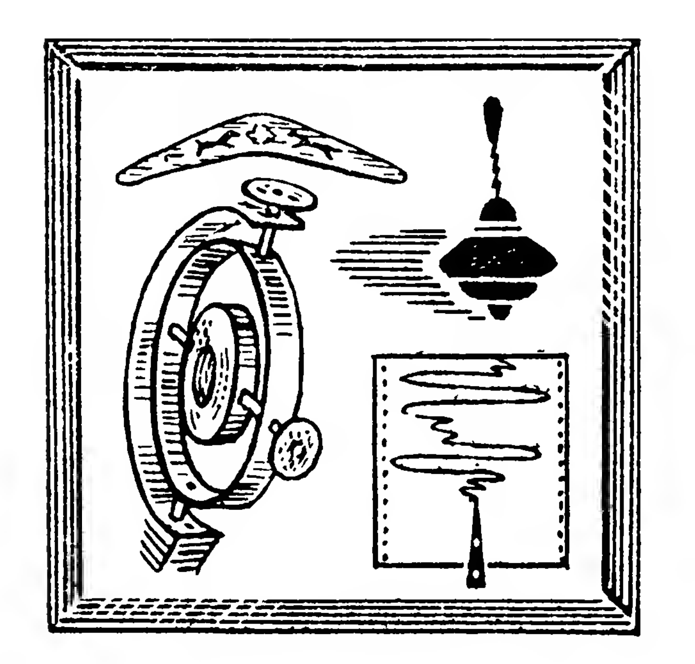
поворота рулей управления обеспечивает устранение возникшего отклонения.

Для поворота ракеты относительно горизонта, который в соответствии с программой ее движения должен на активном участке *ab* (см. рис. 130) осуществляться непрерывно и с различной скоростью, на диске *Д* смонтирован потенциометр $П_3$. Диск с помощью ленточной передачи связан с профилированным кулачком *К*, приводимым часовым механизмом *ЧМ* во вращение вокруг оси, параллельной одновременно как оси *СС* подвеса гироскопа $Г_2$, так и оси $o_c y_c$ ракеты. Профиль кулачка *К* выполняется в строгом соответствии с намеченной траекторией движения. Поэтому диск *Д*, а вместе с ним и обмотка потенциометра $П_3$, вращаясь с переменной скоростью вокруг оси *СС*, поворачиваются с течением времени точно на угол, который должна занимать ракета по отношению к горизонту в заданный момент времени. В результате выполнения описанного поворота нулевая точка потенциометра $П_3$ сместится относительно движка, установленного на гироскопе $Г_2$. При этом с потенциометра $П_3$ будет сниматься сигнал, пропорциональный углу отклонения ракеты от требуемой ориентации по отношению к плоскости горизонта. Указанный сигнал, поступив на рулевую машинку, вызовет поворот рулей управления, что и приведет ракету к заданному по программе направлению. Вот почему описанное устройство и называют программным механизмом.

Центр тяжести гироскопа $Г_3$ смещен на расстояние $l$ вдоль оси *AA* от точки *O* его подвеса. При ускоренном движении ракеты масса $m$ гироскопа вследствие присущей ей инерции будет оказывать сопротивление силам, стремящимся сообщить ей ускорение $w$. Сила инерции, согласно (1) равная произведению $mw$, создаст момент $mwl$, вектор которого будет совмещен с внутренней осью подвеса гироскопа $Г_3$.

Под влиянием указанного момента гироскоп начнет прецессировать вокруг наружной оси подвеса, увлекая за собой и движок $d$. Последний будет отклоняться от первоначального нулевого положения на все больший угол $\alpha$. Движение ракеты с заданным ускорением $w$ позволяет определить ее скорость в любой момент времени, поэтому можно заранее вычислить тот угол $\alpha$, который будет соответствовать максимальной скорости движения ракеты. Выше уже отмечалось, что при достижении ракетой заданной максимальной скорости движения ее двигатель должен быть отключен. При автоматическом выполнении этой операции движок $d$ перемещается вначале по изолятору, а после поворота на угол $\alpha$ он замкнет контакты автомата выключения двигателя.

6 Зак. 514





# IX

## ГИРОСКОП НА ПРОИЗВОДСТВЕ И В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ

### 49. Использование гироскопа в производственных процессах

С каждым годом гироскоп находит все большее применение в целях управления различными производственными процессами. С давних пор люди использовали гироскопический эффект при размоле пород различных минералов. Применявшиеся для этой цели мельничные бегуны, показанные на рис. 132, представляли

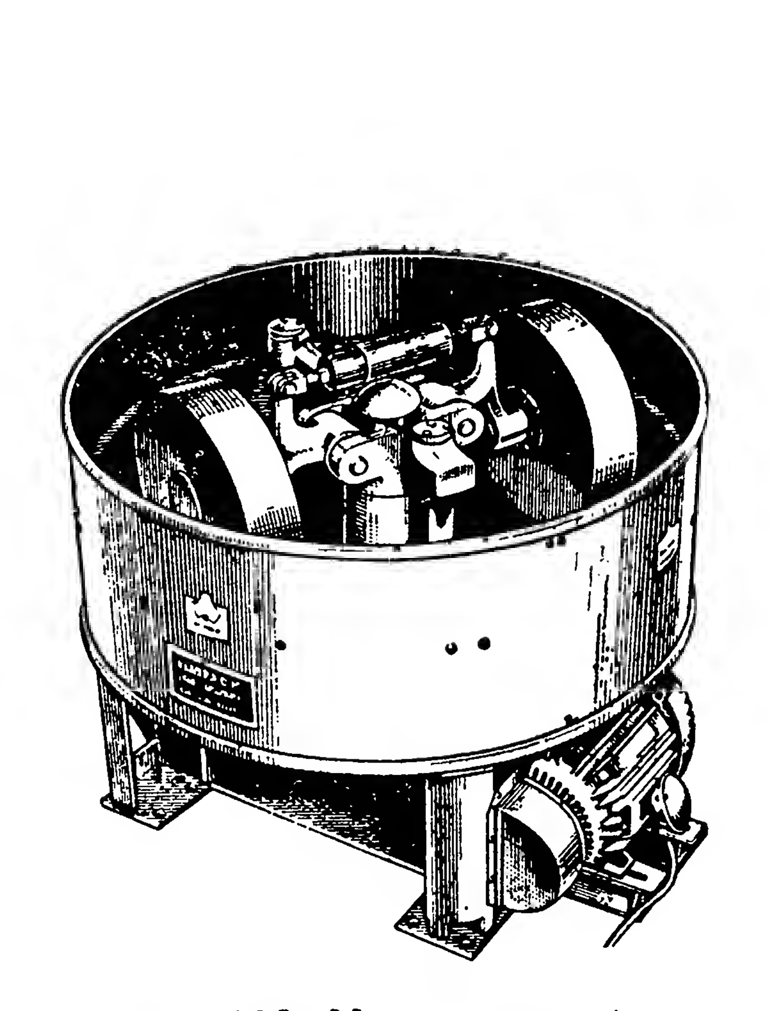


Рис. 132. Мельничные бегуны

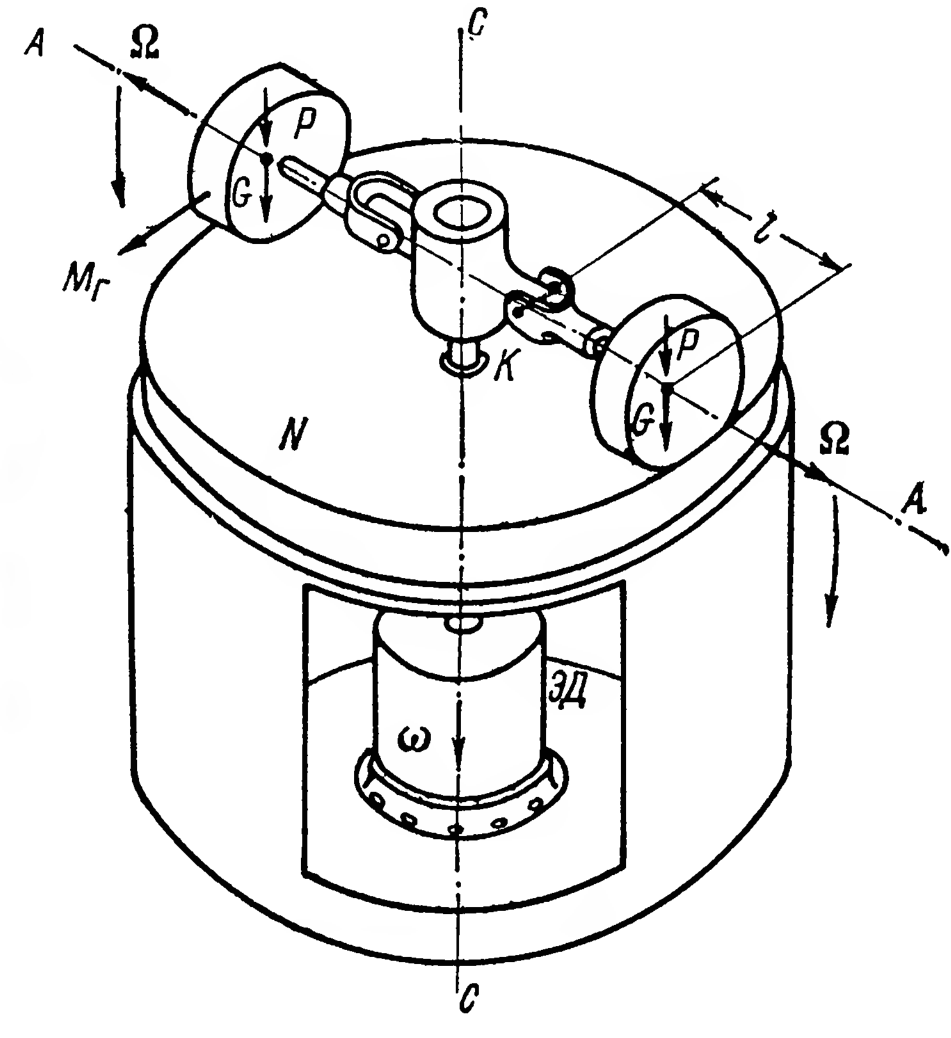



Рис. 133. К объяснению действия гироскопического момента при работе мельничных бегунов

собой два тяжелых катка, опиравшихся на опорную плиту $N$ и шарнирно связанных с главным валом $K$, изображенным на рис. 133, ось $CC$ которого вертикальна.

Приводя электродвигателем $ЭД$ вал $K$ во вращение вокруг оси $CC$ с угловой скоростью ω, перекатывают катки по плите $N$,

сообщая им угловую скорость $\Omega$ вращения вокруг оси $AA$. Если на плиту $N$ насыпать куски какого-либо минерала, то катки, накатываясь, будут их растирать. При этом они действуют на породу не только силой тяжести $G$, но и давлением, появляющимся в результате возникновения гироскопического момента.

Действительно, при вращении катков вокруг осей $AA$ и $CC$ с угловыми скоростями $\Omega$ и $\omega$ возникает гироскопический момент $M_г$. Его величина зависит от момента инерции $J$ катка от-

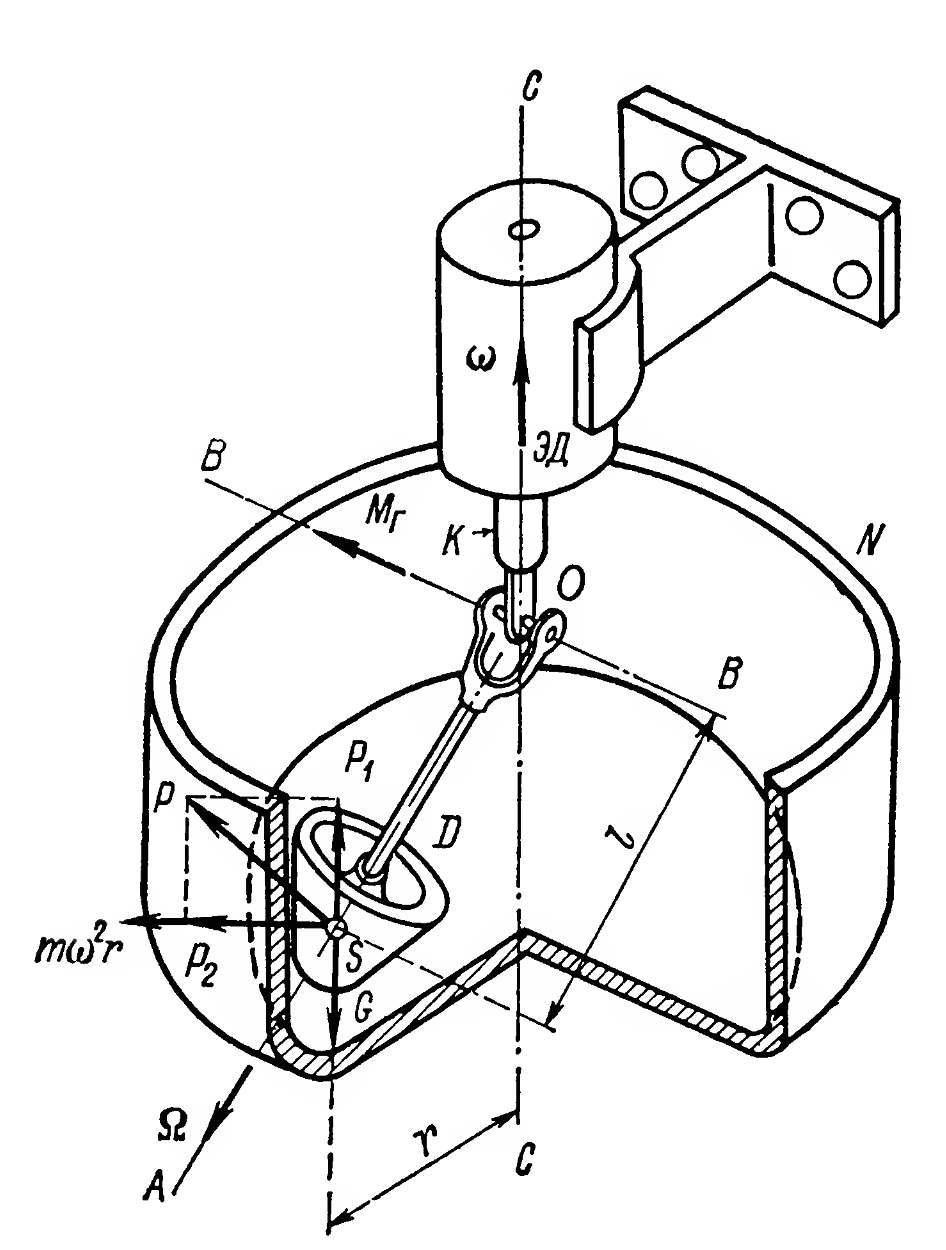



Рис. 134. К объяснению действия гироскопического момента при работе маятниковой мельницы

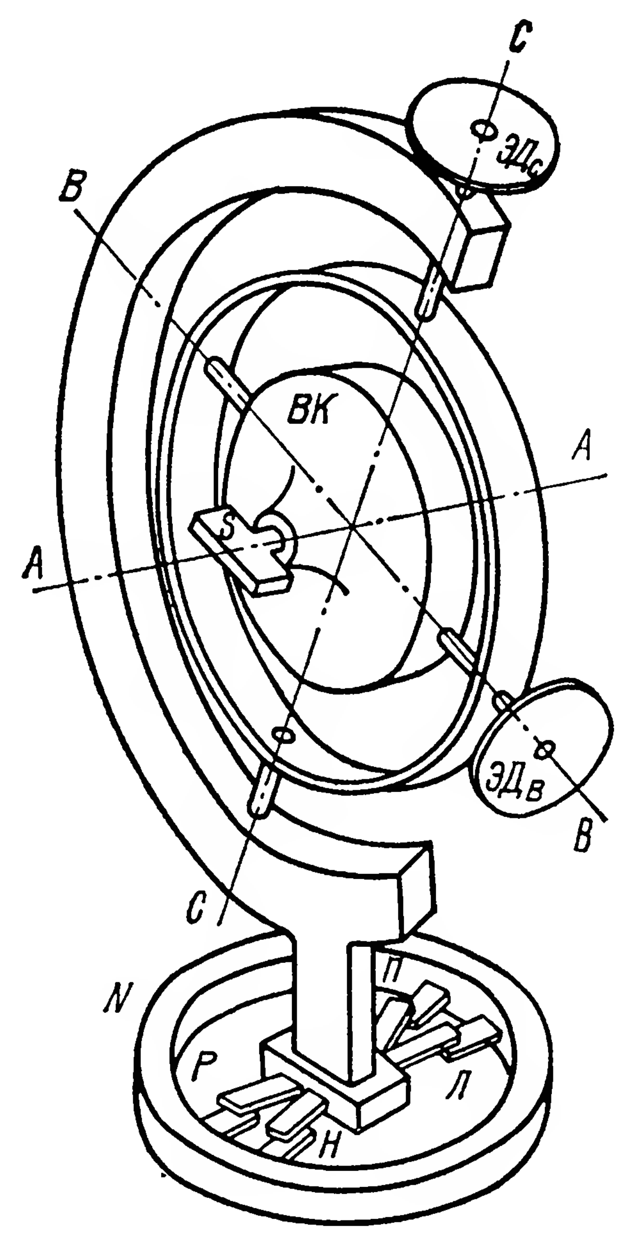



Рис. 135. Схема гироскопического приспособления для сварки мелких деталей

носительно оси $AA$ и угловых скоростей $\Omega$ и $\omega$. Согласно равенству (3) его величина определяется произведением $J\Omega\omega$. При удалении центра массы катка от оси вращения $CC$ на расстояние $l$ момент $M_г$ будет оказывать на плиту $N$ давление $P$, равное, согласно формуле (4), величине $\frac{J\Omega\omega}{l}$. Тем самым будет обеспечиваться более интенсивное дробление породы.

Аналогичная картина наблюдается и при работе маятниковой мельницы, представленной на рис. 134, в которой каток $D$ подвешен как маятник в шарнире $O$ вала $K$. В исходном положении ось $OA$ катка отклонена на некоторый угол от вертикальной оси $CC$ электродвигателя *ЭД*. Поэтому, как только мельница будет приведена во вращение вокруг оси $CC$ с угловой скоростью $\omega$, сразу же возникнет центробежная сила инерции $m\omega^2 r$ массы $m$ катка. Центр массы $S$ его удален от оси $CC$ на

расстояние $r$. Сила, равная $m\omega^2 r$, прижимает каток $D$ к опорной стенке резервуара $N$, а сила тяжести $G$ катка стремится возвратить его к вертикальному положению. Кроме того, перекатываясь по стенке резервуара, каток $D$ совершает одновременное вращение вокруг осей $OA$ и $CC$ с угловыми скоростями $\Omega$ и $\omega$ соответственно, порождая относительно оси $BB$ гироскопический момент $M_г$. Последний обусловливает дополнительное давление $P = \frac{I\Omega\omega}{l}$ на резервуар, которое направлено перпендикулярно оси $OA$. Его значение зависит от момента инерции $J$ катка относительно оси $OA$ и расстояния $l$ его центра массы $S$ от оси $BB$. Разложив силу $P$ на горизонтальную $P_1$ и вертикальную $P_2$ составляющие, замечаем, что первая уменьшает вредное влияние силы тяжести $G$ катка, а вторая, суммируясь с центробежной силой инерции $m\omega^2 r$, увеличивает полезное давление на опорную поверхность. Отсюда следует, что и в маятниковой мельнице гироскопический момент способствует более интенсивному дроблению породы, засыпаемой внутрь резервуара $N$.

Гироскоп нашел применение и как приспособление при сварочных работах. Одна из его разновидностей, показанная на рис. 135, представляет собой массивный ротор, который вращается в гирокамере $BK$. Крышки последней имеют приливы $S$ для закрепления мелких деталей, подлежащих сварке. На осях $BB$ и $CC$ подвеса гироскопа установлены электродвигатели $ЭД_B$ и $ЭД_C$, создающие действующие на гироскоп моменты, значения и направления которых могут регулироваться. Подключение электродвигателей к источнику производится с помощью четырех реостатов, смонтированных в кожухе $N$. Включив ногами контакты $P$ и $H$ левой пары реостатов, подают ток требуемой величины и направления в электродвигатель $ЭД_C$. Возникающий при этом момент относительно оси $CC$ вызовет прецессию гироскопа вокруг оси $BB$. Включив же контакты $П$ и $Л$, электродвигателем $ЭД_B$ создают момент относительно оси $BB$, который порождает прецессию вокруг оси $CC$. Чем больше давление, порождаемое усилием ноги, тем выше будет угловая скорость поворота стола гироскопа вокруг оси подвеса. Описываемое ножное управление обеспечивает поворот площадки $S$ с необходимой скоростью в нужном направлении на любой угол, полностью освобождая, как показано на рис. 136, руки человека от выполнения вспомогательных операций. Указанное приспособление способствует увеличению производительности сварочных работ при изготовлении мелких узлов.

Многие производственные процессы требуют непрерывного измерения объемов расходуемых жидких материалов. Объемы последних при изменении их температуры не остаются постоянными, поэтому выполнение указанного требования было связано с преодолением существенных трудностей. И только использование в этих целях гироскопического эффекта позволило найти рациональное решение поставленной задачи.

В описываемом устройстве, изображенном на рис. 137, расходуемая жидкость из резервуара *Р* поступает в Т-образный патрубок *П*, который смонтирован в корпусе *К* прибора на опорах с уплотнителями. На той части патрубка *П*, которая находится внутри корпуса *К*, закреплены шестерни *Ш* и диск *Д*. Посредством электродвигателя *ЭД* как патрубок, так и диск приводятся во вращение вокруг оси *АА* с угловой скоростью $\omega$. Вследствие вращательного движения жидкость, протекающая внутри

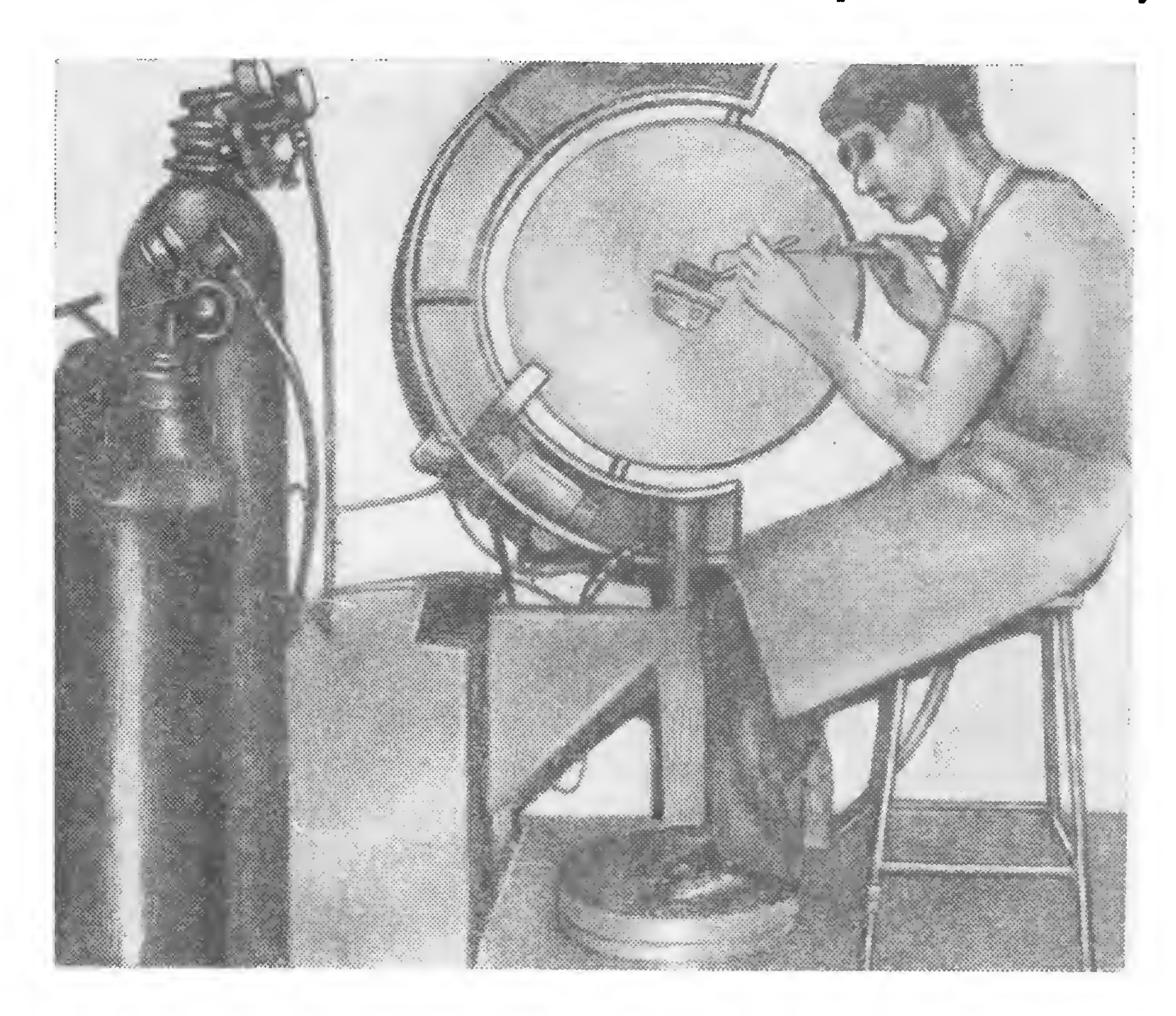


Рис. 136. Работа на гироскопическом приспособлении для сварки мелких деталей

разветвленных концов патрубка *П* со скоростью $v$, как показано на рис. 138, будет вынуждена двигаться с поворотным ускорением $w_п$.

Сила инерции массы $m$ жидкости, равная $mw_п$, вызовет деформацию концов Т-образного патрубка на величину $\Delta$. Масса $m$ и скорость $v$ протекающей по патрубку *П* жидкости зависят от ее расхода, следовательно, силы инерции $2mv\omega$ и порождаемая ими деформация $\Delta$ и будут, в свою очередь, характеризовать расход жидкости. Измерив значение $\Delta$ с помощью индуктивного датчика $L$, определяют величину массового расхода жидкости в любой момент времени.

Гироскоп используется в наше время и для автоматического фрезерования кулачков сложного профиля. Рассмотрим гироскоп с тремя степенями свободы, изображенный на рис. 139, корпус

*К* которого жестко закреплен на фундаменте. Удлиненная главная ось *АА* ротора *Р* заканчивается с одной стороны цилиндром *Ц*, с другой — фрезой *Н*, расстояние $l_2$ которой от точки *О* подвеса гироскопа может регулироваться.

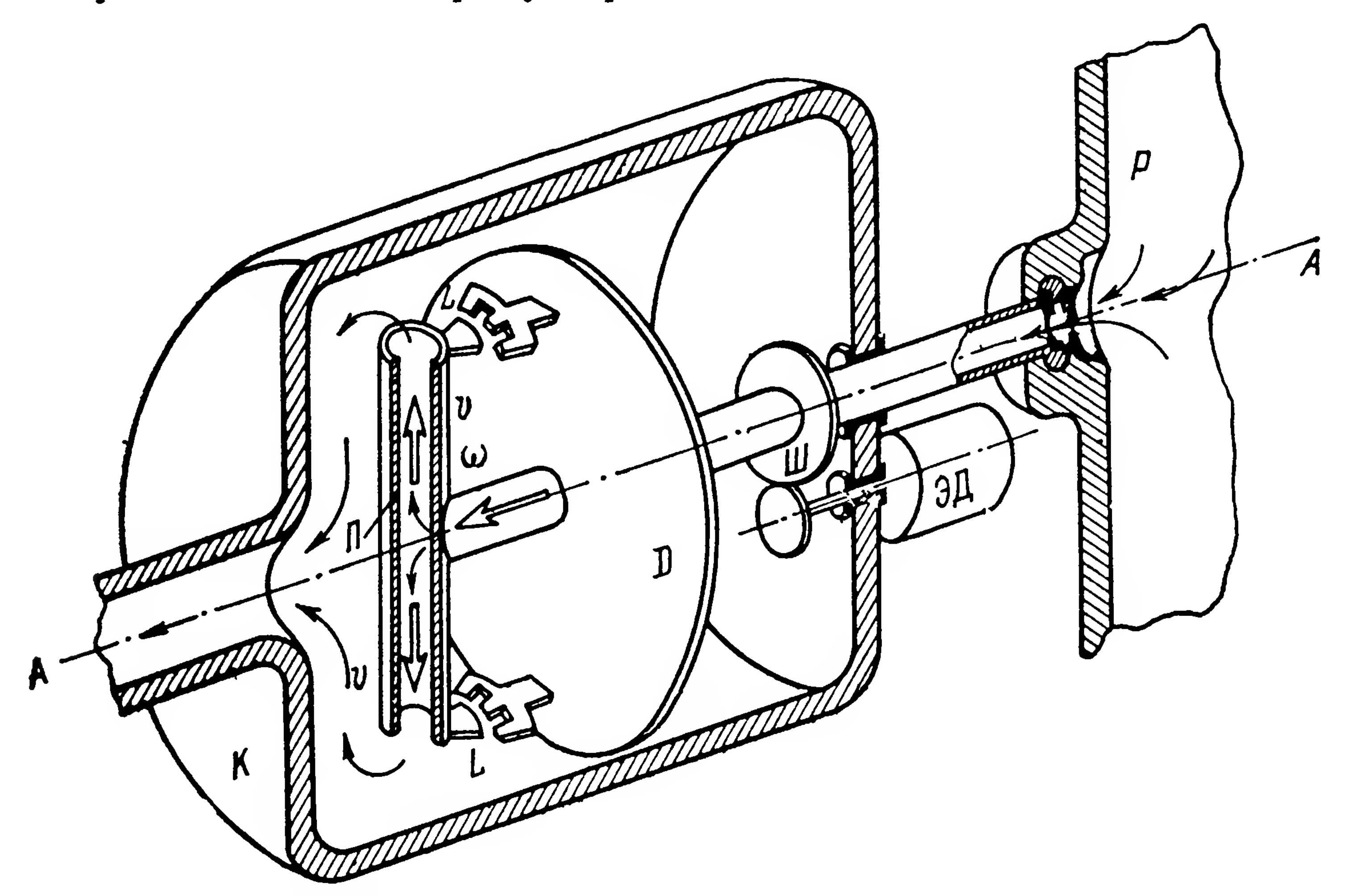



Рис. 137. Гироскопический измеритель расхода жидкости

Если ротору *Р* сообщить вращение вокруг оси *АА* с угловой скоростью Ω, то вместе с ним будут вращаться как одно целое цилиндр *Ц* и фреза *Н*. Подведя вращающийся цилиндр *Ц*

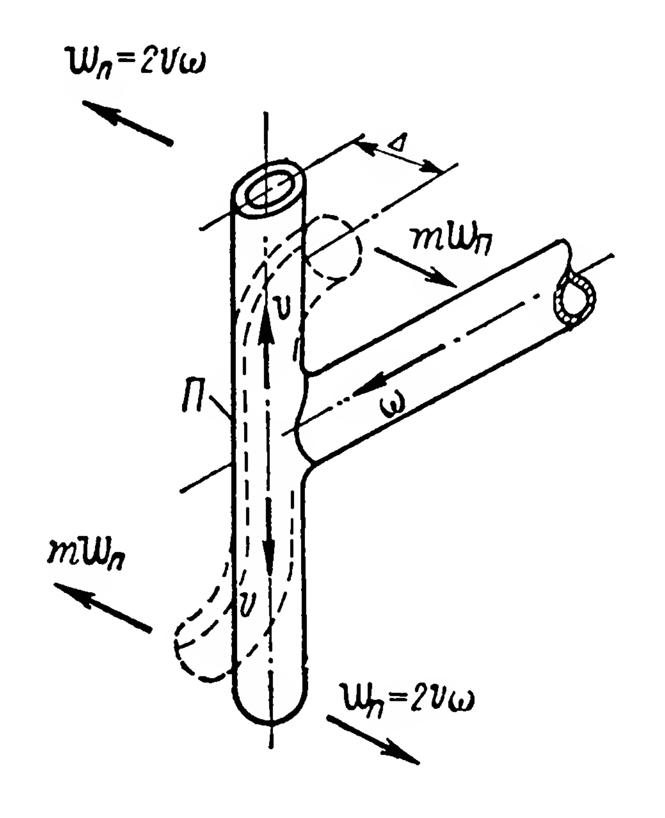



Рис. 138. Схема деформации патрубка гироскопического измерителя расходов жидкости

до совмещения с копиром *D*, жестко закрепленным на стойке *S*, вызывают перекатывание цилиндра по боковой грани копира. Сила *F*, обусловливающая такое перекатывание, зависит от силы трения *Q*, действующей под углом μ к ее направлению. Равнодействующая *R* двух сил *F* и *Q* прижимает цилиндр *Ц* к копиру, обеспечивая перекатывание первого по поверхности второго. Перемещению цилиндра *Ц* по копиру *D* способствует и прецессия

гироскопа, на который со стороны копира действует сила реакции $N$, равная по величине, но противоположная по направлению силе $R$. Будучи приложенной к гироскопу на плече $l_1$, сила $N$ создает относительно точки подвеса $O$ момент $M_в = Nl_1$, вызывающий прецессию гироскопа с угловой скоростью $\omega = \frac{Nl_1}{I\Omega}$, зависящей от момента инерции $I$ ротора $P$. Цилиндр $Ц$, обегая копир $D$ вокруг оси $OO_1$, непрерывно изменяет силу реакции $N$ и создает, в общем случае, моменты относительно сразу двух осей подвеса $OB$ и $OC$. Вместе с гироскопом перемещается и

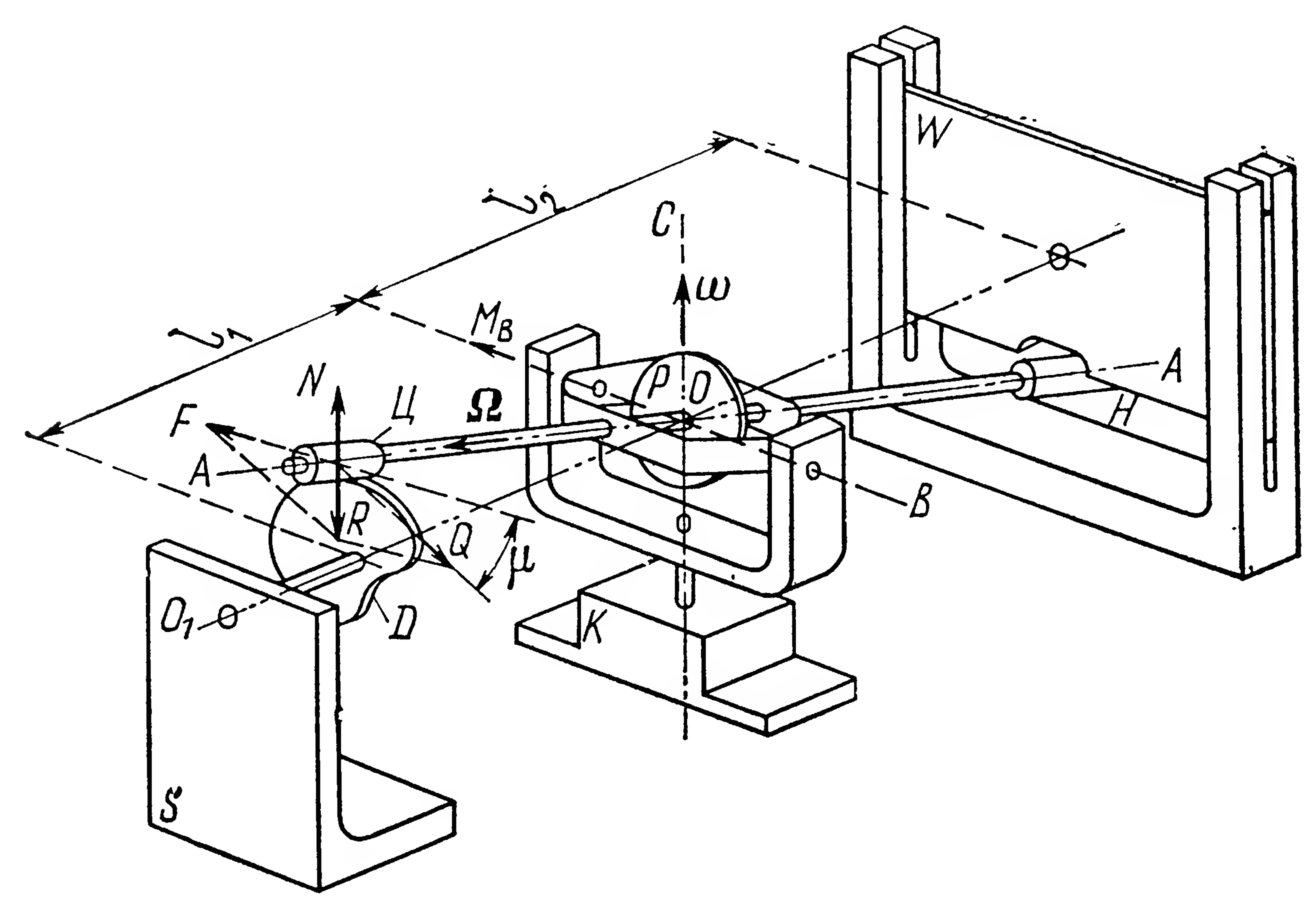



Рис. 139. Схема гироскопического копира

фреза $H$, вырезающая из заготовки $W$ кулачок, повторяющий в выбранном масштабе профиль копира $D$.

Описанными примерами далеко не ограничиваются возможности использования гироскопического эффекта в производственных процессах. Известно, что он применяется в гидравлических насосах, при регулировании угловых скоростей валов гидравлических турбин и электрических генераторов, при создании бесступенчатых редукторов, позволяющих изменять значения угловых скоростей различных агрегатов и в целом ряде других устройств.

## 50. Гироскоп на службе у фотокорреспондентов, кинорепортеров и в автомобильной инспекции

Для наблюдения за далеко отстоящими предметами люди давно начали использовать подзорные трубы, бинокли и другие оптические приборы. Чем меньше размеры наблюдаемого предмета и чем дальше от наблюдателя он расположен, тем большим

увеличением должно обладать визирное устройство. Между тем из-за свойственного людям дрожания рук, обычно нами не замечаемого, сильное увеличение далеко не всегда может быть использовано на практике.

Дело в том, что дрожание рук человека передается увеличительному устройству, отчего наблюдаемая с помощью него картина смазывается тем интенсивнее, чем больше увеличение. Устранить этот недостаток оказалось возможным только с помощью гироскопа.

На одной международной выставке посетителям предлагали обычный шестикратный бинокль и просили прочитать текст плаката, помещенного в противоположном конце зала. После того

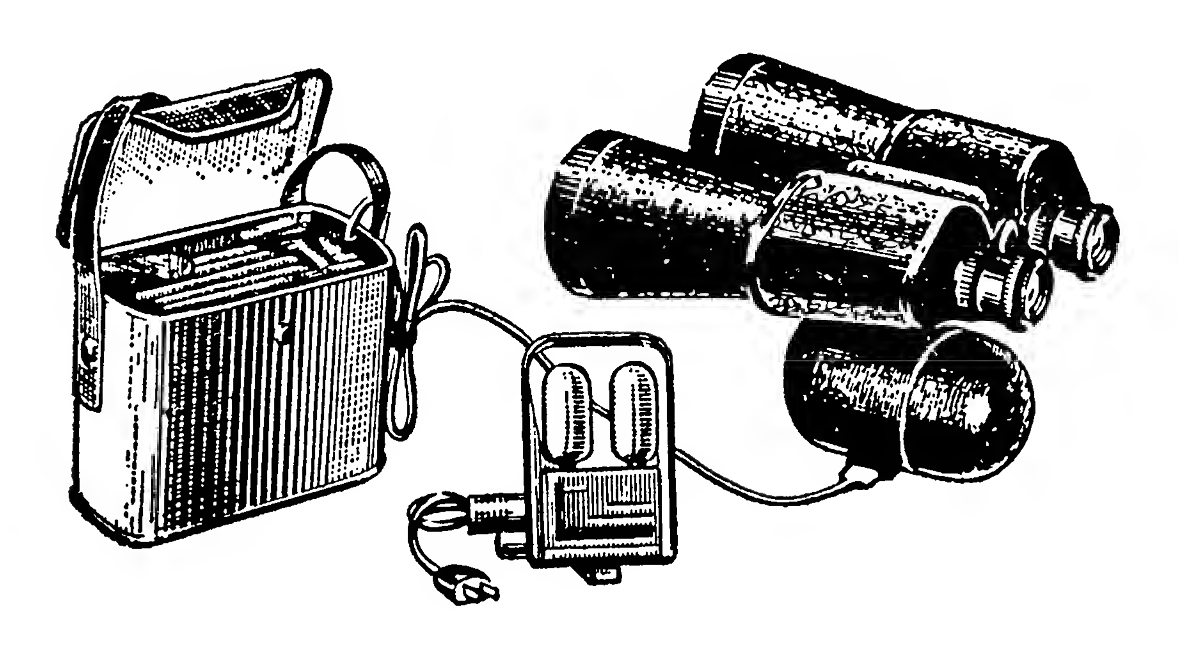


Рис. 140. Комплект бинокля с гиростабилизатором

как выяснялось, что сделать это никто не может, предлагали бинокль с десятикратным увеличением. Однако его использование приводило к более худшим результатам: плакат просматривался как в тумане. И только взяв бинокль с гироскопическим стабилизатором, текст плаката можно было читать свободно.

Гиростабилизатор, как показано на рис. 140, размещался в круглом корпусе, жестко соединенным с биноклем, и приводился в действие от портативного аккумулятора, который был смонтирован в футляре. Последний удерживался на плече с помощью ремня. Конструкция описываемого стабилизатора, иллюстрируемая рис. 141, состояла из корпуса $K$ с двумя двухстепенными гироскопами. Оси $BB$ и $B_1B_1$ их подвесов были отклонены от оси $Oz$ прибора на угол 45° в разные стороны. Благодаря такому расположению каждый гироскоп противодействовал возмущающим моментам, стремящимся повернуть оптический прибор вокруг осей $Oy$ и $Oz$. Один гироскоп в таких условиях реагировал на составляющие внешних возмущающих моментов, лежавшие в плоскости $yOz$, перпендикулярно оси подвеса $B_1B_1$, а второй — на составляющие указанных моментов в той же плоскости, но перпендикулярно оси $BB$. При действии возмущающих моментов гироскопы, прецессируя вокруг своих осей подвеса, создают моменты гироскопических реакций, которые и уравновешивают возмущающие моменты, аналогично гироскопическому успокоителю качки автомобиля (см. рис. 101).

Описываемый гиростабилизатор, демпфируя дрожание рук человека, резко улучшает качество изображения, наблюдаемого

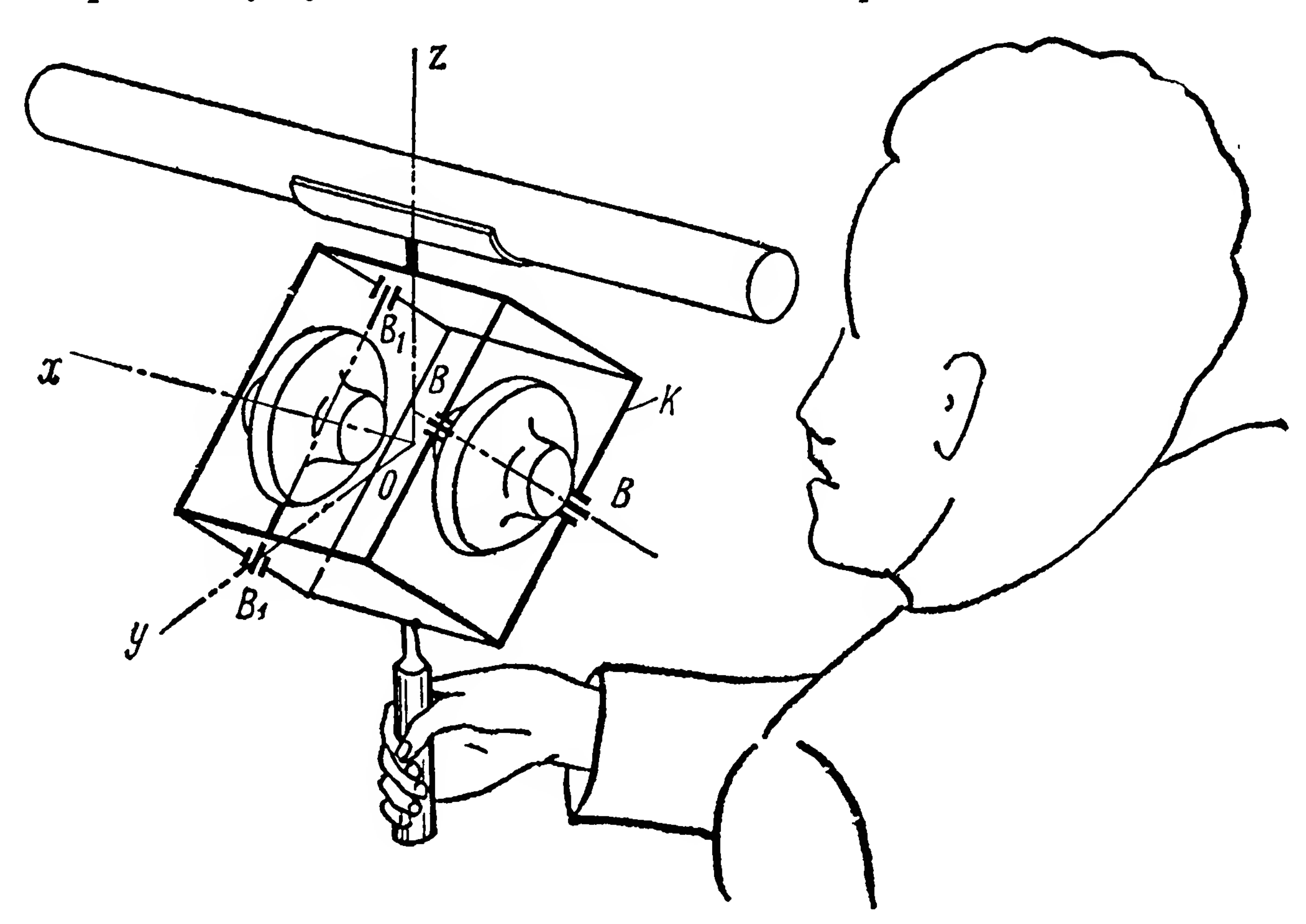



Рис. 141. Схема гиростабилизатора оптического устройства

через оптические приборы многократного увеличения. Благодаря такому преимуществу гиростабилизаторы, как это иллюстрирует рис. 142, с успехом используются в фото- и киноаппа-

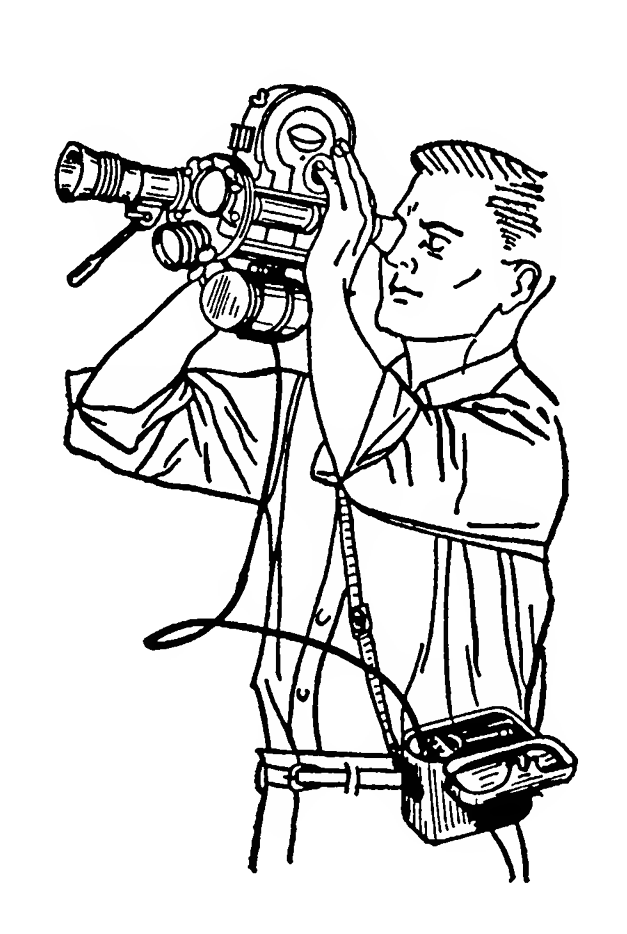


Рис. 142. Съемка киноаппаратом с гиростабилизатором



Рис. 143. Гиростабилизатор бинокля автоинспектора

ратуре, особенно при съемках, требующих применения длиннофокусных объективов.

В последние годы бинокли с гиростабилизаторами пришли на службу и в автомобильную инспекцию, призванную следить за безопасностью движения автомобильного транспорта. Часто

инспекторам приходится определять номер автомобиля нарушителя правил движения на большом расстоянии или во время быстрой езды, когда трудно прочитать цифры номерного знака. При наличии у бинокля многократного увеличения гиростабилизатор оптики (рис. 143) изолируется от воздействия колебаний как рук человека, так и корпуса автомобиля, благодаря чему инспектор может ясно различить в бинокль номер машины на большом удалении.

## 51. Использование гироскопического эффекта на охоте и в цирковых упражнениях

Еще в глубокой древности люди были знакомы с замечательными свойствами быстровращающихся тел. Первобытный человек, использовавший при охоте на птиц и животных метательные палицы, обнаружил, что закрученная при броске палка летит точнее и дальше, чем обычная. Постепенно совершенствуя такой метательный снаряд, племена, не знавшие еще ни лука, ни стрел, создали бумеранг, получивший широкое распространение у австралийцев, индейцев штата Нью-Мексико, горных племен южной Индии и у ряда других народностей. Бумеранг, показанный на рис. 144, представляет собой изогнутую под углом 100—120° деревянную пластину толщиной около 1 см, длина которой достигает полуметра. Такой снаряд обладает удивительным свойством возвращаться после поражения летящей птицы к охотнику. Происходит это потому, что при метании бумеранга ему сообщают не только поступательную скорость $v$ в плоскости, наклонной к горизонту, но и вращение с угловой скоростью $\Omega$ вокруг оси, перпендикулярной плоскости бумеранга. Последний превращается в своеобразный волчок, сохраняющий ось своего вращения стабильной в пространстве в течении всего полета.

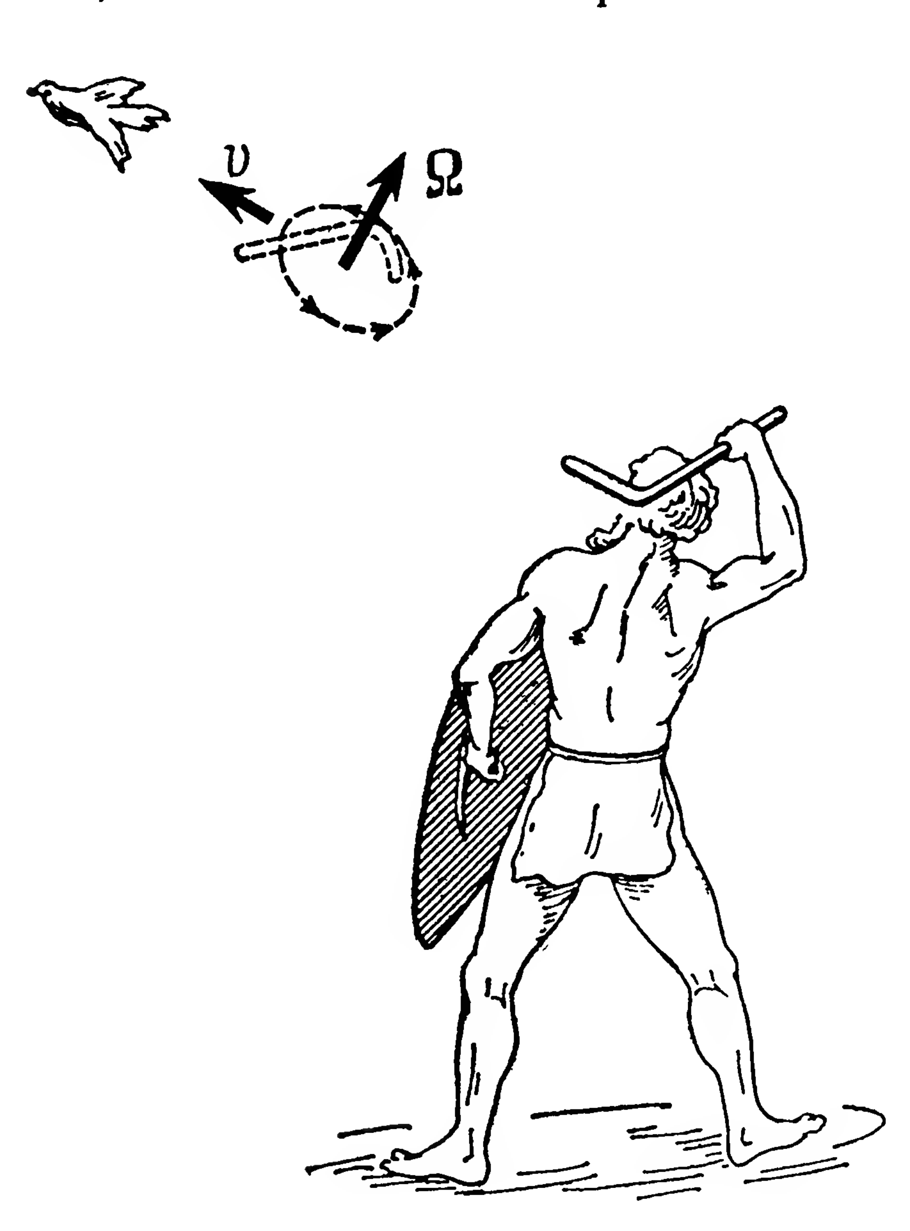


Рис. 144. Гироскопический эффект бумеранга

Когда энергия, сообщенная бумерангу в момент броска, либо иссякает из-за сопротивления воздуха, либо затрачивается на

поражение птицы, он, продолжая вращаться, начинает под действием силы тяжести падать вниз. Но вследствие сопротивления воздуха вращающийся бумеранг, сохраняя направление оси



Рис. 145. Бумеранги массового изготовления

своего вращения неизменным в пространстве, начинает скользить по воздуху и опускается вниз по плоскости, наклонной к горизонту. Поскольку угол между плоскостями вращения снаряда и горизонта остается постоянным, бумеранг, не встретив на своем обратном пути препятствия, возвращается, как правило, к охотнику.

В наши дни бумеранг из орудия охоты превратился в спортивный снаряд, а также получил распространение как памятный сувенир для туристов, путешествующих по Австралии. В настоящее время налажено его массовое производство из пластмассы различных расцветок и с разнообразной отделкой (рис. 145). Деревянный бумеранг сохранился лишь на северо-западе Австралии, в районах, наиболее удаленных от цивилизованных

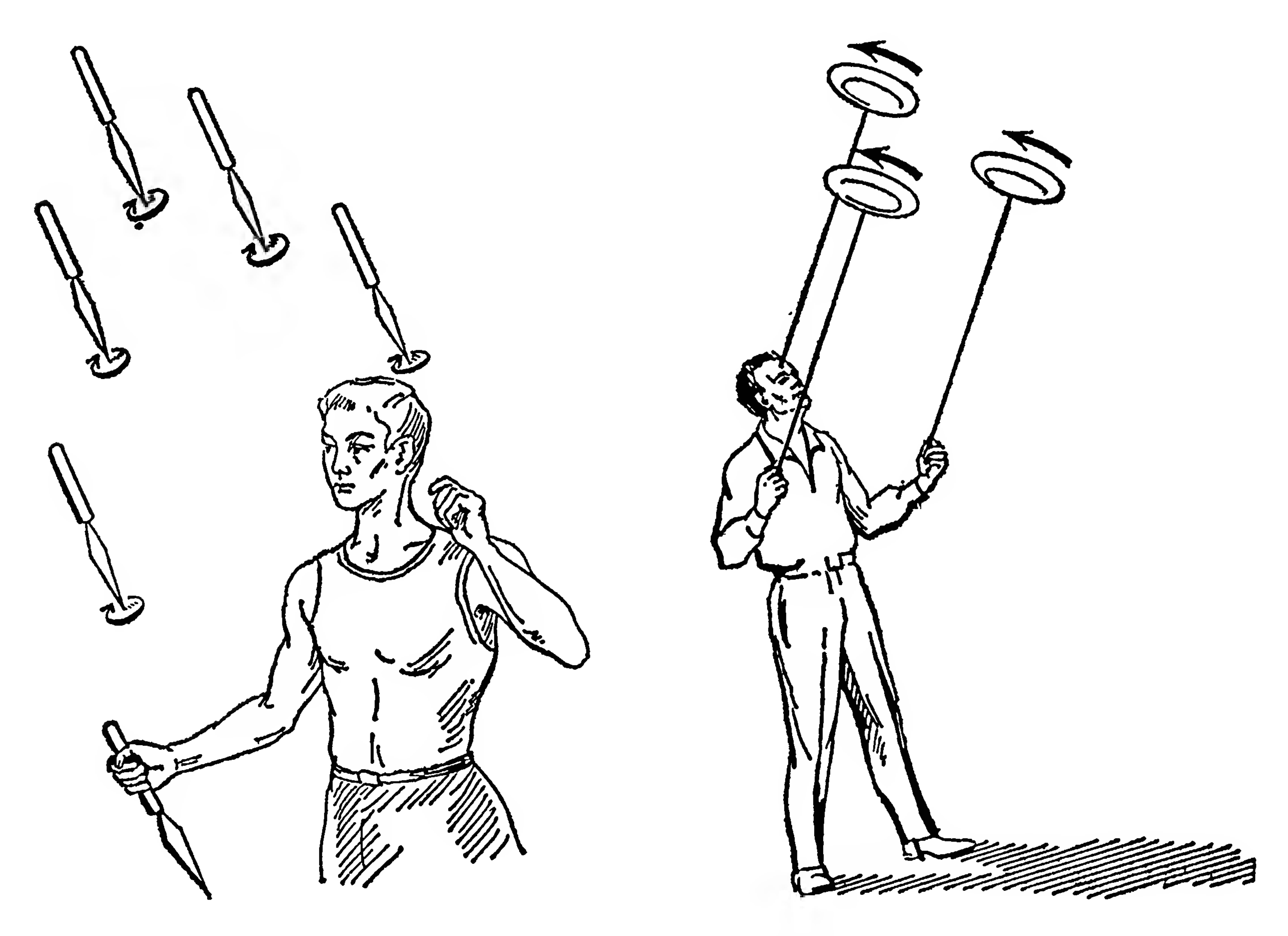


Рис. 146. Жонглирование вращающимися ножами

Рис. 147. Жонглирование вращающимися тарелками

центров. Там коренные жители страны используют его на охоте, при спортивных играх и во время исполнения племенных ритуалов.

Гироскопические свойства вращающихся тел используются и в самом древнем виде искусства — цирковых номерах. Проследите внимательно за работой жонглеров и вы увидите, что они, бросая в воздух ножи, как это изображено на рис. 146, придают им вращение вокруг продольной оси вращения ножей. Оси при этом стабилизируются в пространстве, обеспечивая тем самым выполнение артистом эффектных упражнений.

Та же картина наблюдается и при показанном на рис. 147 вращении мячей или тарелок на концах длинных стержней. Жонглер также удерживает вращающийся мяч на кончике кинжала, заставляет его путешествовать по туго натянутой веревке или лезвию ножа. Все эти трюки основаны на использовании гироскопического эффекта, приобретаемого вращающимися предметами.

## 52. Гироскоп в спорте

Гироскопические свойства вращающихся тел используются и в ходе спортивных соревнований. Так, в метании диска, которое еще в 708 году до нашей эры включалось в программу Олимпийских игр Древней Греции, гироскопический эффект играет важную роль. Во время полета, диск так же как и бумеранг, испытывает сопротивление воздуха. Аэродинамические силы набегающего воздушного потока стремятся так его развернуть, чтобы плоскость его вращения стала перпендикулярной к направлению полета. Для предотвращения указанного разворота

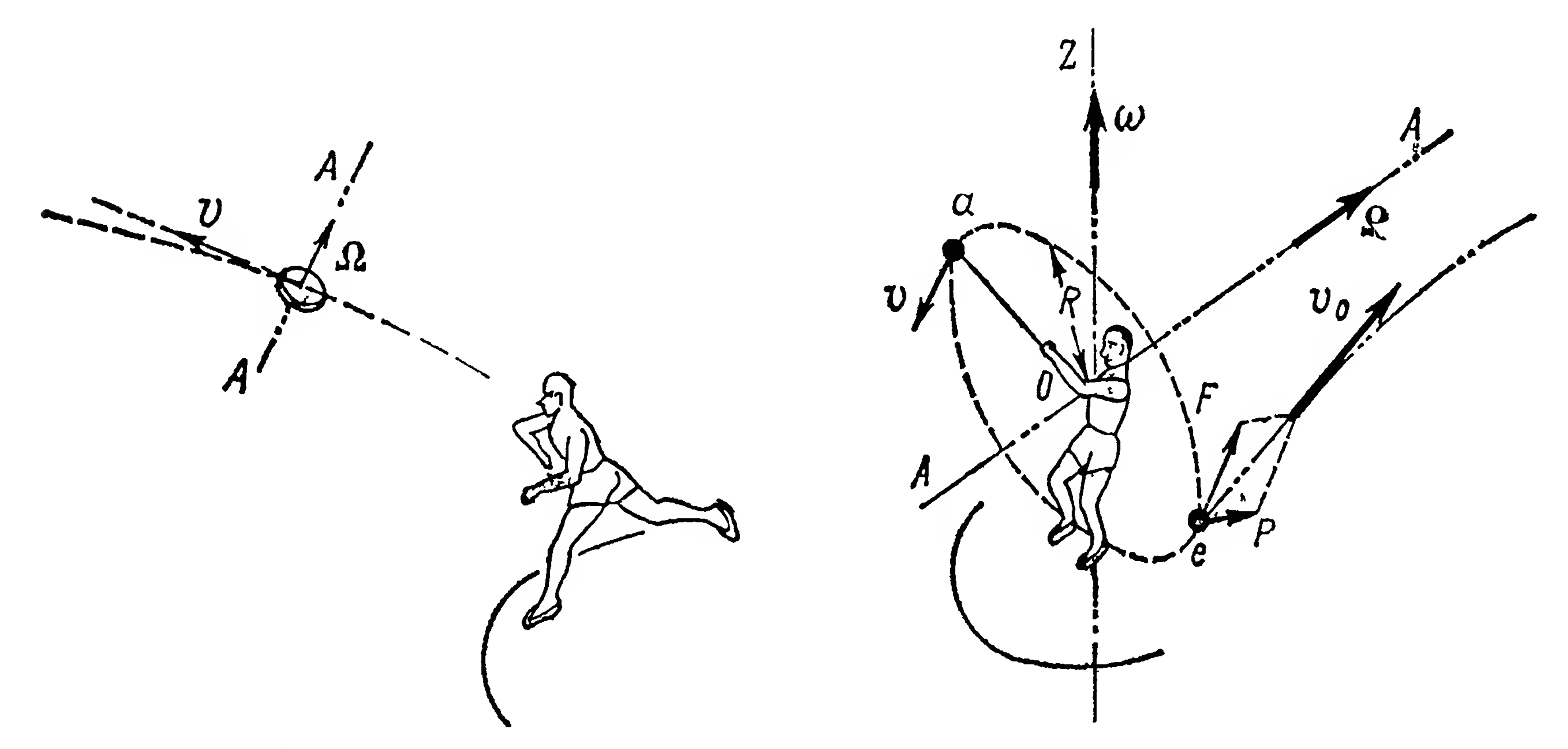



Рис. 148. Метание диска

Рис. 149. Метание молота

диску в момент его запуска, как показано на рис. 148, сообщается не только поступательная скорость $\bar{v}$, но и вращение вокруг оси симметрии $AA$ с угловой скоростью $\Omega$, равной 5—8 об/с. Превращаясь при этом в гироскоп, диск оказывает сопротивление аэродинамическим силам. Его ось вращения $AA$ сохраняет неизменное направление в пространстве, обеспечивая тем самым наибольшую дальность полета.

Поворотное ускорение используется спортсменами и при метании молота. Придавая последнему ускоренное вращение вокруг наклонной к плоскости горизонта оси $AA$, что иллюстрирует рис. 149, метатель стремится сообщить молоту как можно большую угловую скорость $\Omega$. В период подготовки к броску движение молота по окружности радиуса $R = Oa$ происходит со все увеличивающейся окружной скоростью $v$, равной, согласно ранее изложенному, произведению $\Omega R$.

В целях максимального повышения скорости молота к моменту броска метатель на заключительном этапе подготовки к броску делает два резких поворота вокруг вертикали $OZ$ со все увеличивающейся угловой скоростью $\omega$. Тем самым молоту сообщается поворотное ускорение, которое обусловливает появление силы инерции $\bar{P}$, достигающей максимального значения в

точке $e$ траектории движения молота по окружности радиуса $R$. Равнодействующая двух сил — $F$, действующей на молот при его вращении вокруг оси $AA$, и $P$ (силы инерции) — и сообщает молоту в момент броска максимальную скорость $v_0$, а тем самым и наибольшую дальность полета.

Законы движения гироскопа используются также при упражнениях на ренском колесе, входящих в комплекс физической подготовки летчиков и космонавтов. Колесо, изображенное на рис. 150, состоит из двух легких металлических обручей, которые соединены между собой несколькими перемычками. На двух

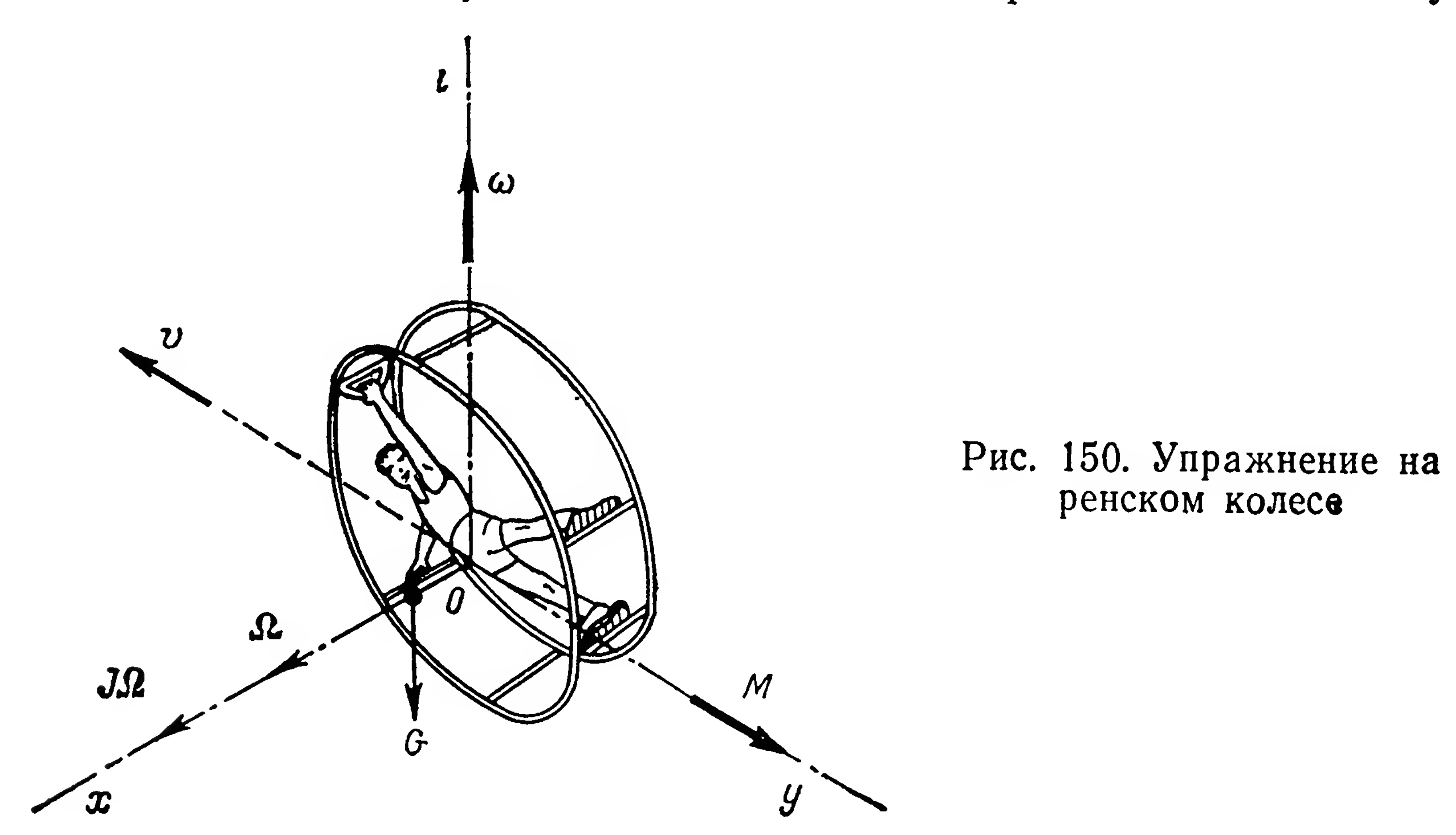



Рис. 150. Упражнение на ренском колесе

из них расположены снабженные крепежными ремнями площадки для ног спортсмена. Две другие являются рукоятками. Укрепив ноги на площадках и держась руками за рукоятки, тренирующийся движениями своего тела раскручивает колесо вокруг оси $Ox$. Последнему, таким образом, придается угловая скорость $\Omega$ и скорость $v$ движения вдоль оси $Oy$.

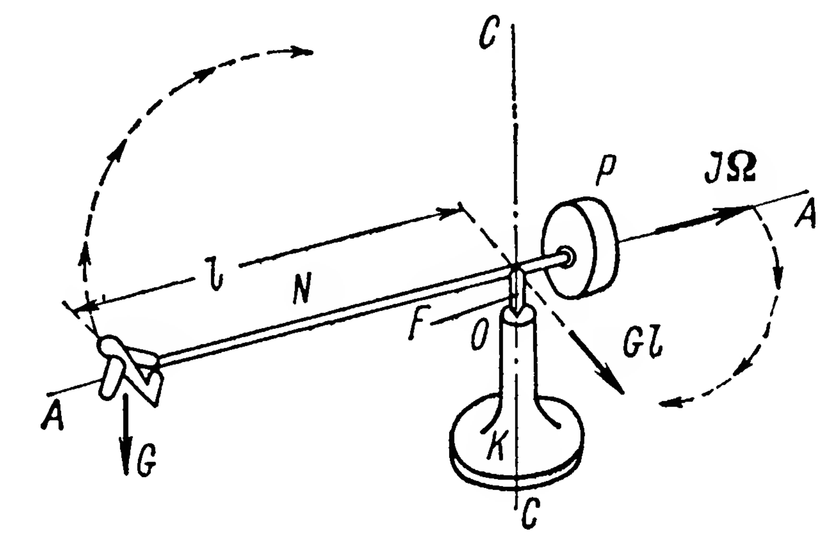
При описанном вращении возникает кинетический момент $J\Omega$, тем больший, чем больше суммарный момент инерции $J$ спортсмена и колеса относительно оси $Ox$. Поэтому для вращения колеса, например вокруг оси $Oz$, спортсмену достаточно сместить центр своей тяжести относительно точки $O$ колеса вдоль оси $Ox$ в сторону желаемого поворота. Если центр тяжести будет смещен по оси $Ox$ в положительном направлении, то сила тяжести $G$ создаст относительно оси $Oy$ момент $M$. Последний вызовет прецессию колеса вокруг оси $Oz$ с угловой скоростью $\omega$, значение которой можно определить, пользуясь равенством (7). Изменяя величину и направление момента $M$, спортсмен может совершать на ренском колесе движения по весьма сложным траекториям.

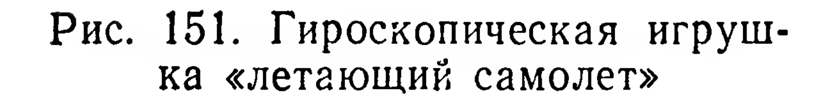
Описанными примерами не ограничивается использование гироскопического эффекта в спортивных играх и упражнениях. В фигурном катании на коньках, прыжках в воду, гимнастиче-

ских упражнениях, в художественной гимнастике и во многих других видах спорта гироскопический эффект широко используется спортсменами для выполнения сложных фигур. Для того чтобы баскетбольный или футбольный мяч двигался по криволинейной траектории, ему сообщается вращение вокруг соответствующей оси. Законы движения гироскопа используются спортсменами для резкого изменения направления полета волейбольного и теннисного мячей и во многих других спортивных играх.

## 53. Гироскопические игрушки

Движущиеся и, в особенности, вращающиеся предметы всегда привлекают внимание ребенка. Первоначальное желание потрогать диковинный предмет с течением времени переходит в стремление ребенка своими силами заставить его совершать вращение. Вероятно, такое естественное желание и явилось причиной





Рис. 151. Гироскопическая игрушка «летающий самолет»

повсеместного возникновения древнейшей народной игрушки — вращающегося волчка. И всюду привлекал он к себе живой интерес пытливых людей. Волчок и в наше время остается одной из любимейших игрушек детей.

Детские волчки выпускаются промышленностью в больших количествах. Им придается красивая форма (см. рис. 7). Корпус волчка снабжается музыкальным устройством, а его наружная поверхность ярко раскрашивается. Кроме волчка можно встретить и более оригинальные гироскопические игрушки. Одна из них, показанная на рис. 151, состоит из коромысла $N$, которое заостренным концом соединенного с ним штифта $F$ опирается на подставку $K$. На удаленном конце коромысла $N$ закреплена модель самолета, а на коротком — смонтирован ротор $P$, который с помощью бечевки может быть приведен во вращение вокруг оси $AA$. Длинное плечо имеет бо́льшую массу, чем короткое. В связи с этим центр массы коромысла $N$ не совпадает с точкой $O$ его опоры на основании $K$. Поэтому сила тяжести $G$ коромысла создает на плече $l$ подвеса $O$ момент $Gl$.

При вращении ротора $P$ вокруг оси $AA$ с угловой скоростью $\Omega$ вследствие сообщения ему кинетического момента $J\Omega$ под действием момента $M$ волчок начнет прецессировать вокруг оси $CC$, стремясь совместить вектор $J\Omega$ с вектором внешнего момента $M$.

Вместе с ротором $P$ вокруг оси $CC$ будет поворачиваться и коромысло $N$ с установленным на нем самолетиком. В результате создается полное впечатление, что последний летит вокруг оси $CC$.

Основной частью гироскопической игрушки «танцор на канате», показанной на рис. 152, является приводимый во вращение вокруг своей оси ротор, масса которого и стабилизирует игрушку на натянутой проволоке. При вращающемся роторе танцор уверенно перемещается по проволочке, не падая с нее вниз. На этом же принципе построены и однорельсовые гироскопические игрушки — вагончики и им подобные.



Рис. 152. Гироскопическая игрушка «танцор на канате»

Проявление гироскопического эффекта используется и в древнейшей грузинской игре «полисудри», основным элементом которой является деревянный диск, показанный на рис. 153, *а*. Последний выполняется заодно с валом, на который наматывается шелковый шнурок длиной около 1,5 м. Удерживая свободный конец шнурка в руке, опускают «полисудри» вниз. При разматывании шнурка диск полисудри приобретает вращение вокруг своей оси (рис. 153, *б*). В момент когда шнурок полностью раскрутится и диск опустится до конца вниз (рис. 153, *в*), его вращение не прекратится. Стабилизировав ось своего вращения в пространстве, диск полисудри начнет наматывать шнурок на вал (рис. 153, *г*). Легкое движение руки помогает диску подыматься по шнурку вверх (рис. 153, *д*). Когда шнурок вновь накрутится на вал и диск достигнет руки играющего, его опять бросают вниз. Цикл движения повторяется снова, но уже в обратном направлении. Если в процессе описанного вращения потянуть за шнурок в направлении, не совпадающем с вертикалью, то диск начнет прецессировать вокруг вертикальной оси, описывая одновременно сложные нутационные колебания (см. рис 31).

Особый интерес не только у детей, но и у взрослых вызывает игрушка «тип-топ», или переворачивающийся волчок, изображенная на рис. 154, основу которой составляют шарик со срезанным на высоте около половины его радиуса шаровым сегментом. По плоскости среза со сферическим основанием волчка соединена цилиндрическая шейка, которая выступает за

сферу шарика. Если такому волчку сообщить вращение вокруг оси цилиндрической шейки, когда последняя направлена вертикально вверх, то волчок быстро перевернется на 180°. В новом положении он будет продолжать дальнейшее устойчивое вращение, опираясь теперь на свою шейку.

Такой удивительный поворот волчка «тип-топ» объясняется тем, что, как явствует из рис. 155, его вращение происходит не на острой ножке, как у обычного волчка, а на шаровой поверхности радиуса $R$ (рис. 155, *а*). Поэтому волчок, будучи приведенным во вращение вокруг оси $Oz$ с угловой скоростью $\omega_z$,

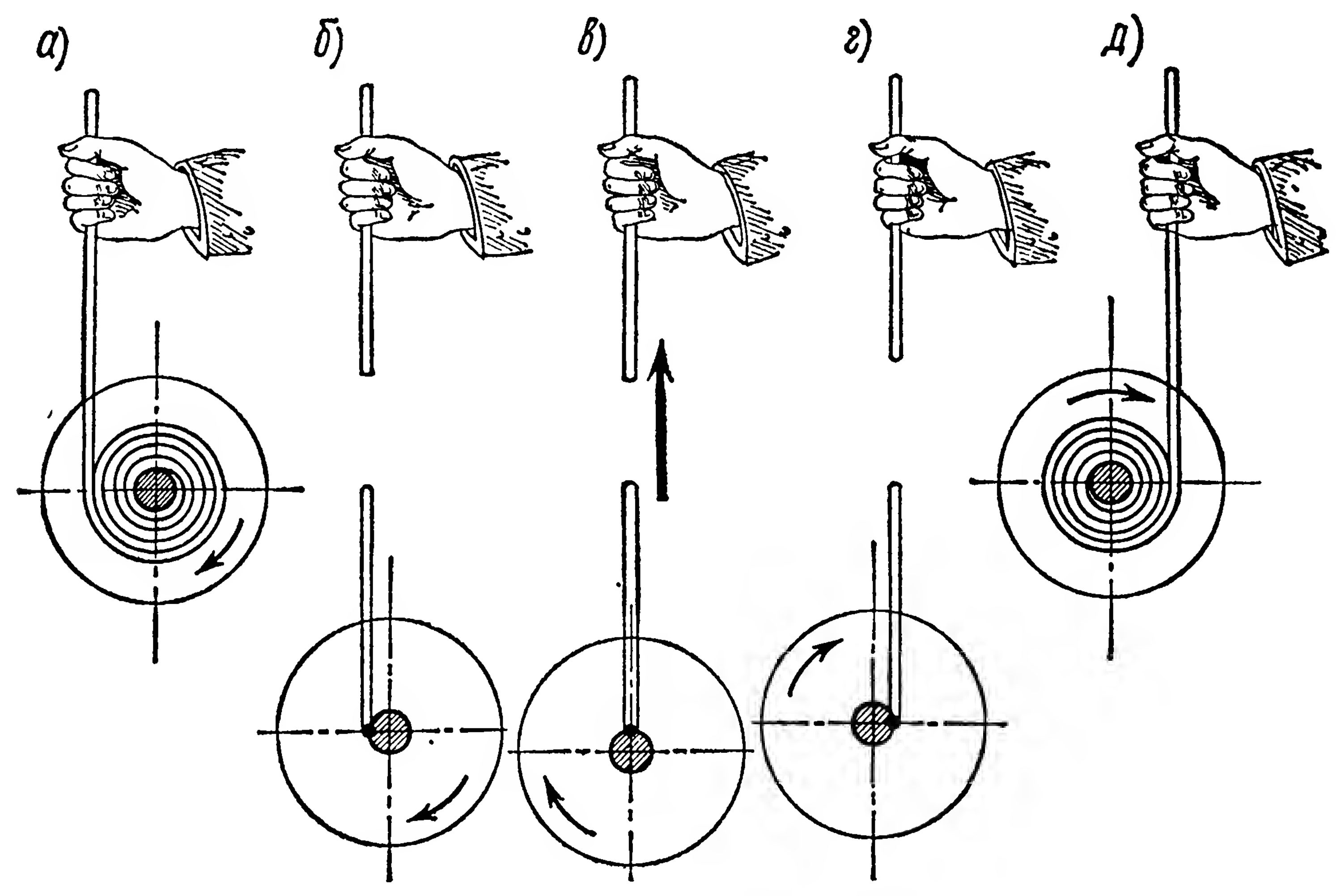



Рис. 153. Игра «полисудри»

сразу же начинает осью $OA$ своей симметрии описывать вокруг вертикали $Oz$ конус с весьма малым углом $\Delta$ при вершине (рис. 155, *б*). При возникновении даже малого угла рассогласования $\Delta$ центр массы $d$ волчка сразу же сместится относительно вертикали $Oz$ на некоторое расстояние $r$. Возникнет центробежная сила инерции $m\omega_z^2 r$, величина которой зависит от массы $m$ волчка, угловой скорости $\omega_z$ сообщаемого ему вращения и от удаления $r$ его центра массы $d$ от оси $Oz$. Указанная сила инерции создает относительно точки $O$ на плече $l$ момент $M = m\omega_z^2 rl$, стремящийся, как показано на рис. 156, повернуть волчок вокруг оси $OB$ в направлении по часовой стрелке, если смотреть от читателя. Под влиянием возникшего момента $M$ гироскоп согласно закону прецессии начнет поворачиваться вокруг оси $OC$, стремясь совместить вектор $J\Omega$ своего кинетического момента с вектором момента $M$. Угловая скорость $\omega$ этого поворота согласно формуле (7) определится из равенства

$$\omega = \frac{M}{J\Omega} = \frac{m\omega_z^2 rl}{J\Omega}.$$

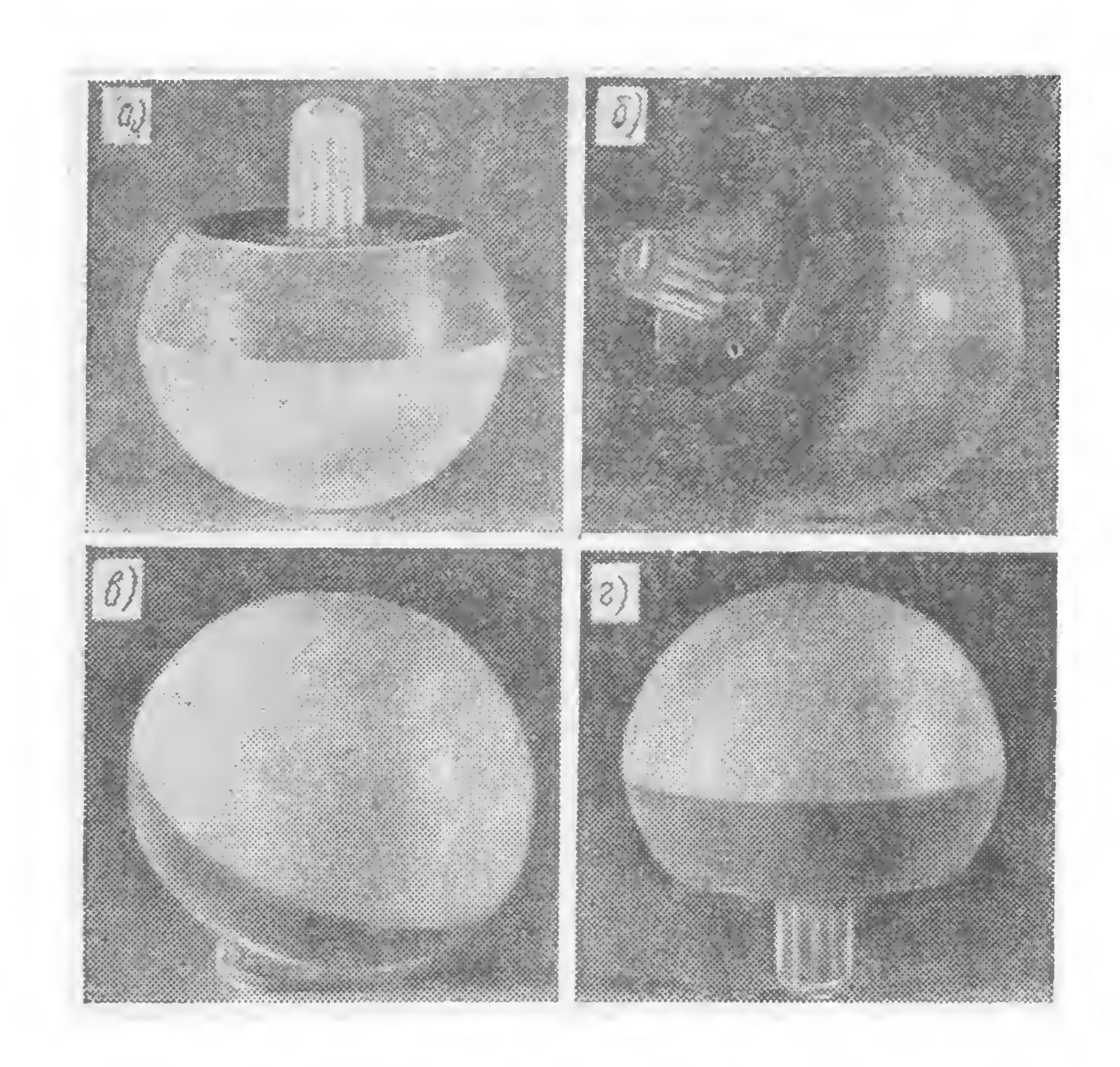



Рис. 154. Волчок «тип-топ»

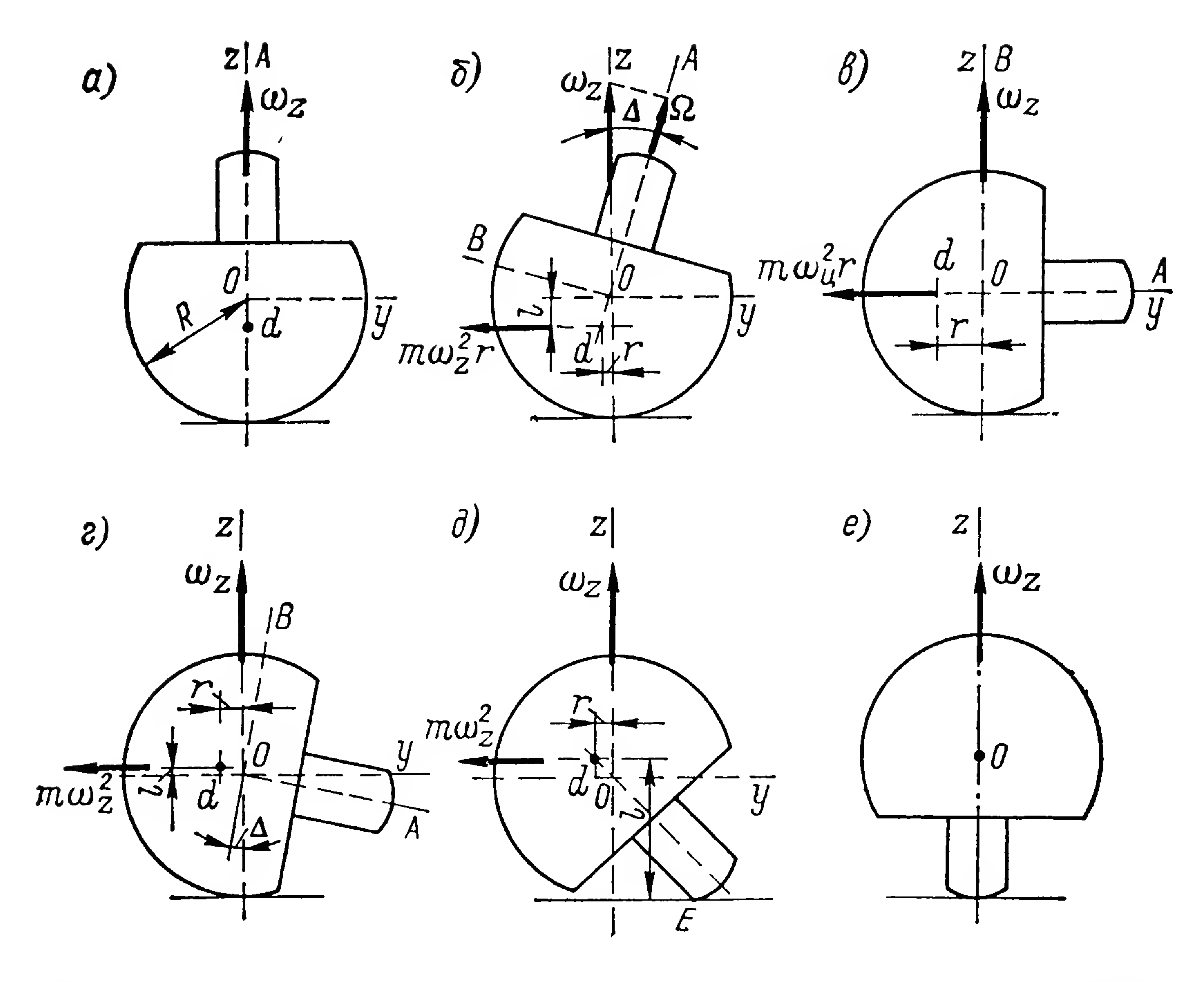



Рис. 155. Центробежные силы инерции, возникающие при вращении волчка «тип-топ»

При этом момент количества движения волчка вокруг оси $Oz$ будет оставаться постоянным и равным $J_z\omega_z$, в связи с чем угловые скорости $\Omega$ и $\omega$ будут определяться как стороны параллелограмма, подчиняясь зависимости

$$I_z\omega_z = \sqrt{(I\Omega)^2 + (I_c\omega)^2} = \text{const}.$$

Как показывают последние выражения, с увеличением угла $\Delta$ отклонения оси $OA$ волчка от вертикали $Oz$ угловая скорость $\Omega$ будет уменьшаться, а $\omega$ — увеличиваться. В результате поворот волчка вокруг оси $OC$ будет непрерывно ускоряться и волчок быстро примет горизонтальное положение (см. рис. 155, *в*).

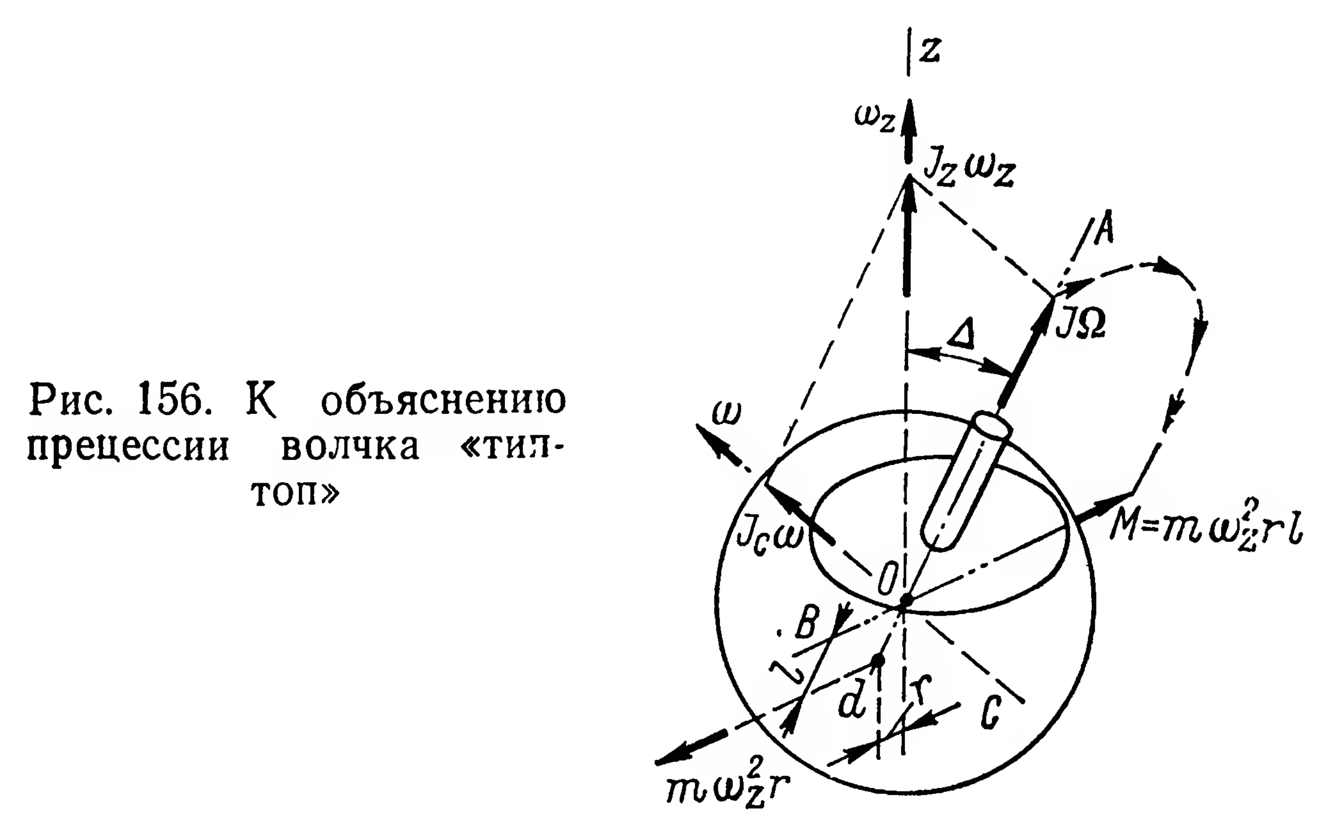
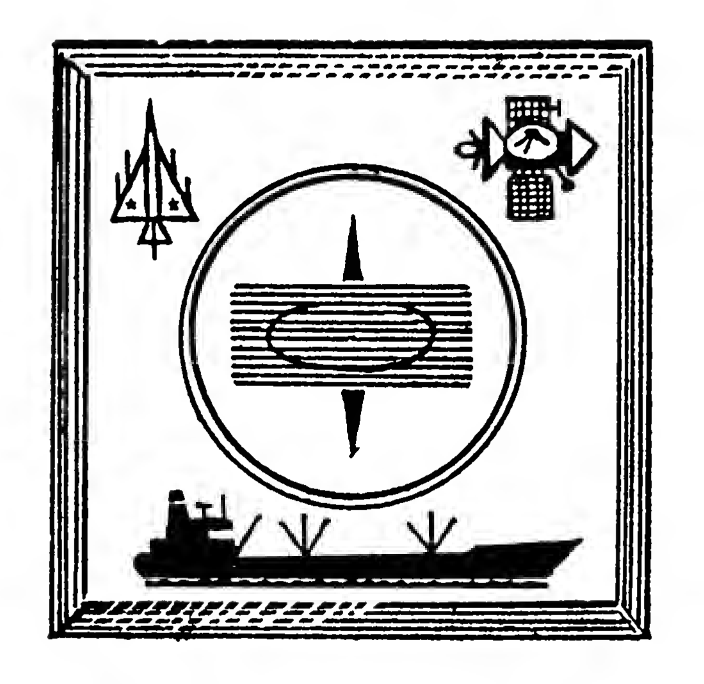



Рис. 156. К объяснению прецессии волчка «тип-топ»

Центробежная сила $m\omega_z^2 r$, вектор которой будет теперь проходить через центр массы $d$ волчка, уже не создает момент относительно точки $O$. В это мгновение волчок будет вращаться с угловой скоростью $\omega_z$ только вокруг оси $OB$, совмещенной с вертикалью $Oz$. По аналогии с первым мгновением (см. рис. 155, *б*), волчок, вращаясь вокруг оси $Oz$, будет образовывать вокруг нее конус с углом $\Delta$ при вершине (см. рис. 155, *г*). Вновь возникнет момент $m\omega_z^2 rl$, вектор которого будет направлен от читателя через точку $O$ перпендикулярно плоскости чертежа. Под влиянием этого момента волчок начнет прецессировать вокруг оси $OA$, стремясь совместить свою ось $OB$ с горизонтальной плоскостью, аналогично тому, как это было показано на схеме, приведенной на рис. 156. При таком повороте волчок быстро совместится своей цилиндрической частью с поверхностью стола (см. рис. 155, *д*). В это мгновение сила инерции $m\omega_z^2 l$ создаст увеличивающийся момент относительно точки опоры $E$, поэтому волчок, прецессируя, почти мгновенно повернется вокруг нее и встанет на боковую поверхность своей цилиндрической части (рис. 155, *е*). При этом он будет продолжать вращение вокруг оси $Oz$ с угловой скоростью $\omega_z$.





# X

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ

## 54. Роль гироскопа в научных исследованиях

Выше уже отмечалось, что еще в 1852 г. Л. Фуко для доказательства суточного вращения Земли использовал волчок, подвешенный в корпусе прибора с помощью двух кардановых колец (см. рис. 16). Такой прибор, названный им гироскопом, за прошедшие почти полтора столетия получил столь широкое распространение, что в наше время вряд ли найдется отрасль народного хозяйства, которая не использовала бы его замечательные

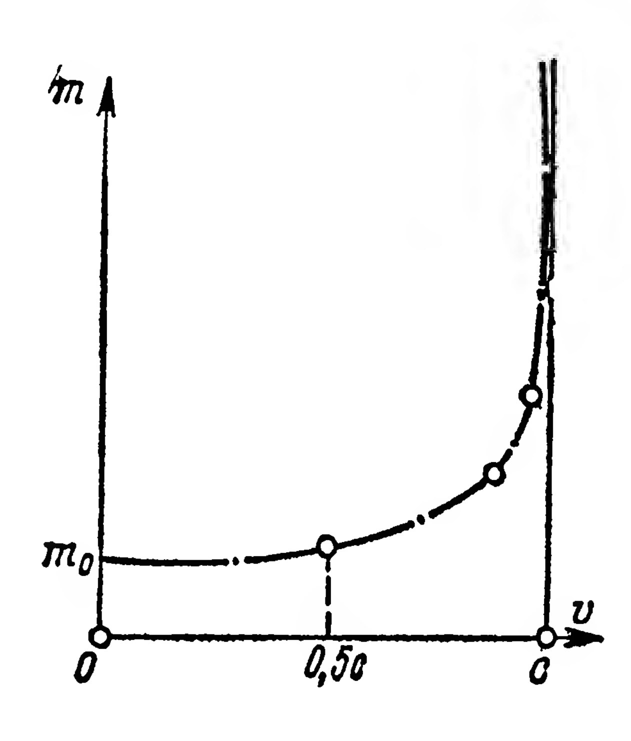



Рис. 157. Характер изменения массы тела в зависимости от увеличения скорости его движения

свойства для решения стоящих перед нею задач. Количество последних растет с каждым годом, причем требования к точности гироскопических устройств при этом непрерывно ужесточаются.

Так, например, в наше время все чаще поднимается вопрос о практическом подтверждении общей теории относительности, опубликованной А. Эйнштейном в 1916 г. Согласно последней масса $m$ двигающегося тела не остается равной ее значению $m_0$ при неподвижном положении (когда $v_0 = 0$), а изменяется в зависимости от скорости $v$ ее движения как показано

на рис. 157, подчиняясь уравнению

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \qquad (8)$$

где $c$ — скорость света, равная 299 792 км/с.

Результаты научных исследований показывают, что практическая проверка справедливости равенства (8) может быть осуществлена лишь с помощью высокопрецизионного гироскопа с тремя степенями свободы (см. рис. 31). Действительно, введя в равенство (7) обозначение

$$2(m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2 + \ldots + m_n l_n^2) = m\rho^2,$$

можем с учетом формулы (8) суммарное значение угловой скорости дрейфа гироскопа записать в виде равенства

$$\omega_\Sigma = \frac{M}{m\rho^2\Omega} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \frac{M}{m_0\rho^2\Omega}.$$

Последнее с использованием метода приближенных вычислений после преобразований можно записать в виде

$$\omega_\Sigma = \omega + \omega_m = \frac{M}{m_0\rho^2\Omega} - \frac{1}{2}\left(\frac{v}{c}\right)^2 \frac{M}{m_0\rho^2\Omega}. \qquad (9)$$

Заметим, что первое слагаемое равенства (9) с возрастанием внешнего момента $M$ увеличивается значительно интенсивнее, чем второе (см. рис. 157). Это особенно проявляется при малых значениях отношения $\frac{v}{c}$. Поэтому для обеспечения низкой угловой скорости $\omega$ отклонения гироскопа от заданного ему направления в пространстве, возмущающий момент $M$ должен быть, как отмечалось ранее, предельно малым. Практика показывает, что допустимым значением момента $M$ у современных курсовых гироскопов является такое, которое обеспечивает угловую скорость $\omega$ отклонения в азимуте, не превышающую $7 \cdot 10^{-4}$ рад/с.

Таким образом, эксперимент по определению изменения массы $m$ ротора гироскопа при увеличении скорости $v$ несущего его космического корабля может быть осуществлен лишь при достижении последним, как минимум, первой космической скорости $v = 7{,}9$ км/с. В этом случае, гироскоп, перемещаясь по орбите вокруг Земли, будет отклоняться в пространстве с суммарной угловой скоростью $\omega_\Sigma$, определяемой равенством (9). Если дрейф гироскопа, выбранного для проведения рассматриваемого эксперимента, был бы ограничен угловой скоростью $\omega \leqslant 7 \cdot 10^{-4}$ рад/с, то значение второй составляющей $\omega_m$ суммарной величины $\omega$ , которая определяется вторым слагаемым зависимости (9), было бы равно

$$\omega_m = \frac{1}{2}\left(\frac{v}{c}\right)^2 \frac{M}{m_0\rho^2\Omega} = \frac{1}{2}\left(\frac{7{,}9}{299792}\right)^2 \cdot 7 \cdot 10^{-4} = 4{,}9 \cdot 10^{-13}.$$

Полученный результат показывает, что величина $\omega_m$ должна быть столь мала, что воспользоваться для ее определения обычным механическим гироскопом не представляется возможным. Для проведения указанного эксперимента предполагается использовать специальный гироскоп, работающий в вакууме при температуре близкой к абсолютному нулю и защищенный от внешних электромагнитных возмущений специальным экраном. Возможность создания такого прибора, согласно работе [28], в настоящее время вполне реальна.

Говоря о проявлениях гироскопического эффекта в окружающей нас природе, нельзя не отметить и то обстоятельство, что

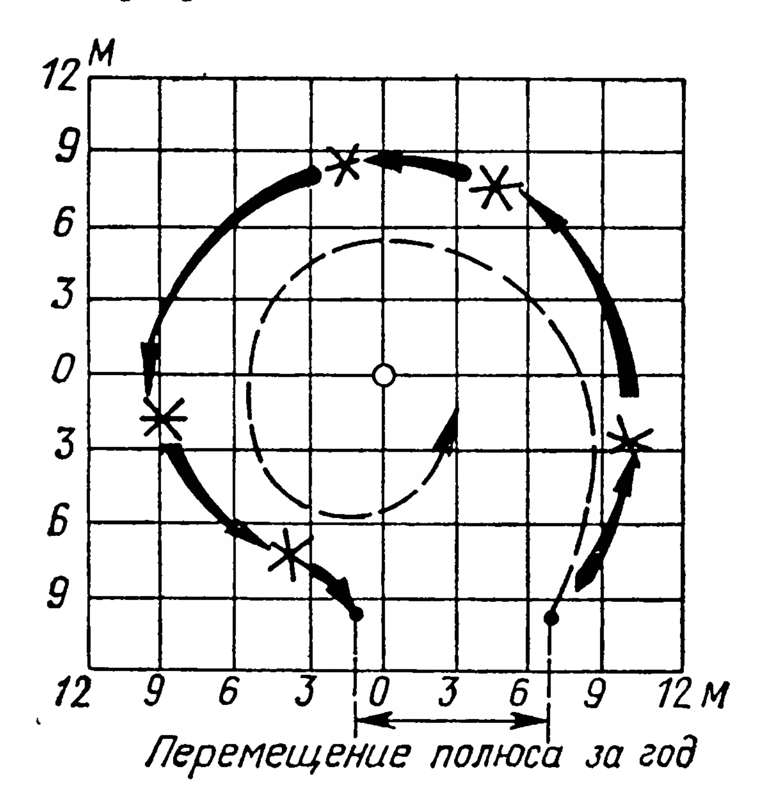



Рис. 158. Кривая перемещения географического полюса Земли в течение года

в последние годы все чаще высказываются мнения [36] о непосредственной связи между землетрясениями и изменениями направления земной оси. Взаимосвязь этих двух явлений обусловливается проявлением гироскопического эффекта. Действительно, каждое землетрясение создает достаточный по величине момент импульса силы. Именно каждый такой импульс и порождает нутационные колебания Земли вокруг оси, смещенной относительно географических полюсов $N$, $S$ (см. рис. 42) на больший или меньший угол.

Наблюдения за связью между землетрясениями и смещениями земной оси, проводившиеся в течение 1955—1965 гг., показали, что происходившие в тот период времени землетрясения в 15 случаях совпадали с искажениями затухающей кривой изменения положения полюса. Характер таких искажений на протяжении одного года иллюстрирует рис. 158. На этом же рисунке пунктирной линией показана теоретическая кривая, по которой должны были бы происходить затухающие перемещения географического полюса Земли, если бы ей не сообщалось дополнительное возмущение. Последнее порождается землетрясениями, места возникновения которых помечены звездочками.

Количество примеров проявления гироскопического эффекта в явлениях природы, известных человечеству, с каждым годом возрастает. Гироскопическому моменту подчинены как непре-

рывно вращающиеся в процессе своего перемещения в пространстве небесные светила, так и микроскопические организмы, населяющие нашу планету. Здесь же отметим только то, что даже катастрофы, происходящие время от времени с кораблями и самолетами в районах Бермудского треугольника и в других подобных ему «загадочных» местах, в последнее время также стали объяснять возникновением гироскопических моментов [19].

## 55. Волчок, дрейфующий во льдах Арктики

Потребность в обеспечении круглогодичного мореплавания в северных широтах обусловила необходимость в непрерывном наблюдении за погодными условиями и состоянием льдов в водах, омывающих северные берега нашей Родины. Естественно, что желание иметь долговременные прогнозы ожидаемых погодных условий и ледовой обстановки привело к созданию сети метеорологических станций вдоль Северного морского пути, одной из главнейших среди которых является станция «Северный полюс». Она разбивается в Северном Ледовитом океане вблизи от географического полюса Земли на одной из больших льдин. Размеры последней должны быть достаточными для того, чтобы свободно разместить на ней палатки для жилья членов экспедиции, запасы продуктов питания и горючих материалов, специальное оборудование станции и техническое оснащение посадочной полосы для приема прибывающих самолетов.

Однако ледяные поля не сохраняют неизменным свое положение. Течения, ветры и другие возмущающие факторы приводят льды океана в движение, в результате которого часто возникают их сжатия. Ледяные поля начинают разламываться, заставляя членов экспедиции срочно в аварийном порядке перебазировать станцию на новую льдину. Приходится спасать продукты жизнеобеспечения, научную аппаратуру и оборудование. Естественно, что такая работа в зимнюю стужу, в сплошной темноте, при сравнительно малом количестве зимовщиков весьма затруднительна и всегда сопряжена с опасностями.

Для устранения аварийных положений в Советском Союзе предложен оригинальный проект [33] дрейфующей станции, выполненной в виде металлического поплавка шаровой формы. Такую станцию предполагается доставлять на ледоколе как можно ближе к географическому полюсу и спускать там на воду, как показано на рис. 159, *а*. Подводные конические участки станции $K_1$ и $K_2$, выполненные из стали повышенной прочности, имеют резьбовые нарезки с разными углами наклона. На первом участке этот угол более пологий, чем на втором.

В сильные морозы вода, замерзнув, сковывает станцию сплошным ледяным панцирем, с которым она и дрейфует как одно целое (рис. 159, *б*). При подвижке льдов, особенно при их сжатии, станцию начинает выдавливать из ледового покрова

с некоторой скоростью $v$ (рис. 159, *в*). Благодаря наличию резьбовых нарезок на конических участках $K_1$ и $K_2$ корпуса станции, последняя при указанном выдавливании получает также и вращение с угловой скоростью $\Omega$ вокруг оси $OA$. Станция превращается в своеобразный гигантский вращающийся волчок, обладающий большой кинетической энергией, которая определяется произведением $J\Omega$. Поэтому и после прекращения передвижки льдов она будет продолжать вращение. В процессе этого вращения конические участки $K_1$ и $K_2$ станции, благодаря резьбовым нарезкам, будут фрезеровать лед, расширяя отверстие для

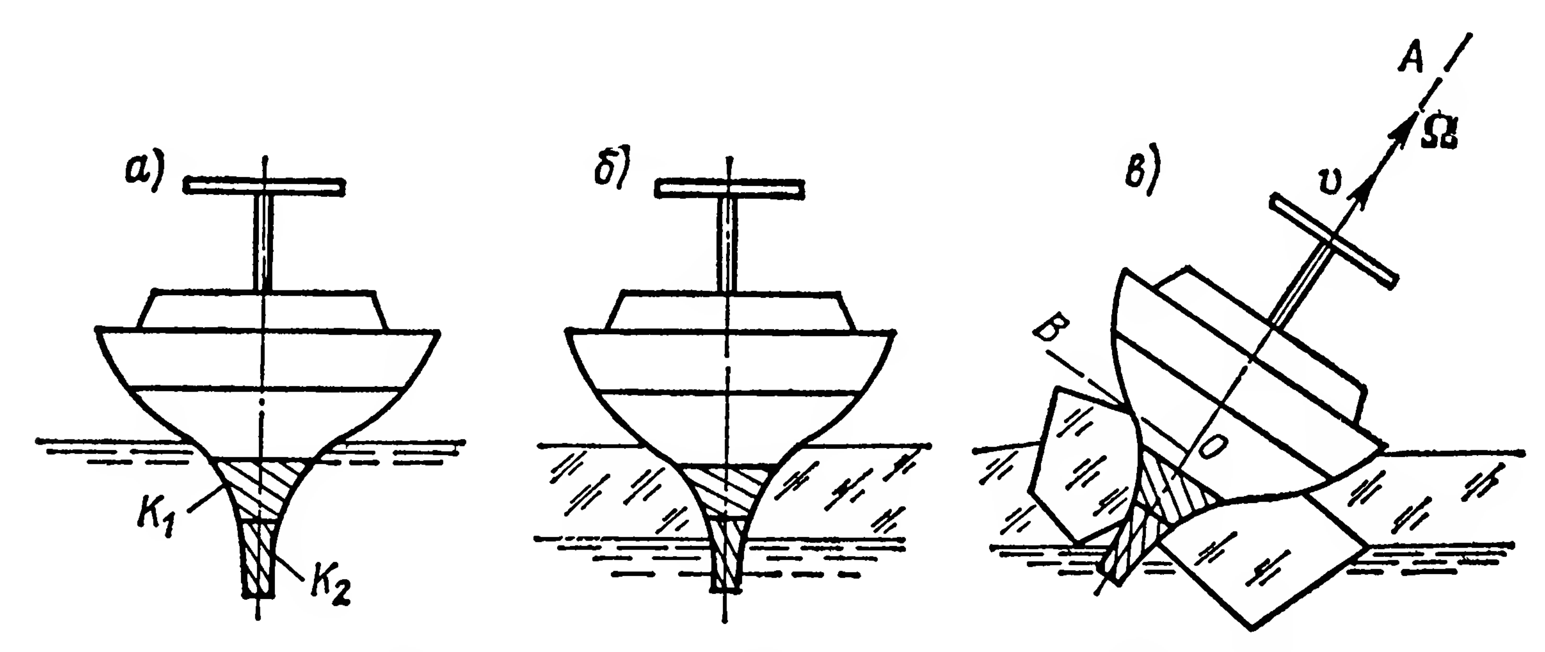



Рис. 159. Положения непотопляемой станции, дрейфующей во льдах

возвращения станции в первоначальное плавучее положение (см. рис. 159, *а*). Такому возвращению будет способствовать еще и то, что центр массы станции лежит значительно ниже ее ватерлинии $OB$.

## 56. Использование гироскопических свойств вращающихся масс в пищевой промышленности

Гироскопический эффект в последние годы находит себе применение не только в приборостроении или машиностроении, но даже и в пищевой промышленности. Так, в начале семидесятых годов гироскопические свойства вращающихся масс были использованы в процессах отделения сливок от молока и осветления фруктовых соков. Несколько позже гироскопические явления послужили основой создания установок для очистки головок лука от шелухи и в ряде других механизмов для процессов обработки пищевых продуктов.

Долгие годы привод сепаратора, широко используемого в маслоделательной промышленности и в других родственных отраслях, имел зубчатую передачу и обычный электродвигатель, работающий при частоте напряжения только 50 Гц. В этих условиях валу сепаратора обеспечивалось вращение лишь с частотой 3000 об/мин, что явно снижало не только производительность труда, но и сдерживало повышение качества вырабатываемого продукта. Многие десятилетия специалисты безрезультатно пытались увеличить частоту вращения сепаратора — ос-

новной фактор повышения качества его работы. И только в наше время советские специалисты успешно решили стоявшую перед ними задачу. Использовав в качестве привода гиромотор [8], так широко распространенный в приборостроении, они существенно увеличили обороты сепаратора, подняв их до 24 тыс. в минуту.

Ротор гиромотора и цилиндр сепаратора теперь стали единым целым, поэтому габариты всего устройства резко уменьшились. Кроме того, цилиндр сепаратора подвесили в корпусе прибора с помощью кардана, что положительно сказалось на плавности работы сепаратора, даже и при возможной случайной его динамической неуравновешенности. Все эти факторы увеличили долговечность работы сепаратора и повысили качество вырабатываемой продукции.

Большого внимания и значительных расходов требовала в прошлые годы и очистка головок лука от шелухи. Последний, как известно, идет во многие консервы самых разнообразных рецептов и заготовляется в сушеном виде в больших количествах. При ручном характере производства его переработка приводила к необходимости использовать многочисленную рабочую силу. Самым же главным фактором было то, что обильное выделение луком эфирных масел отрицательно влияло на здоровье работающих, вызывая острую боль в глазах и обильное выделение слез.

Замену ручного труда машинным и тем самым устранение указанных недостатков при одновременном увеличении производительности труда позволило осуществить применение для указанной цели гироскопического эффекта [49]. В разработанном устройстве луковицы предварительно раскручивались между двумя горизонтальными дисками. Приобретая в процессе такой операции стабильность осей своего вращения, луковицы выбрасывались центробежными силами за пределы дисков и пропускались между специальными ножами, которые срезали у них верхний и нижний сегменты. Раскрученные луковицы как своеобразные волчки, сохраняя неизменными положения своих осей вращения в пространстве. (см. рис. 13) попадали далее во вращающийся барабан, в который со всех концов подавался под давлением сжатый воздух, и быстро очищались от шелухи.

## 57. Волчок становится спортивным инвентарем

Ранее отмечалось, что гироскопический эффект нашел широкое применение во многих упражнениях и спортивных играх. Его искусное использование способствовало повышению как технических результатов в отдельных видах спорта, так и росту мастерства в играх с мячом. Существенно отметить, что в последние годы в спортивных соревнованиях стали не только использовать гироскопический эффект вращающихся тел, но и непосредственно применять волчок в качестве спортивного снаряда, аналогичного футбольному мячу, диску или молоту.

Правда, еще в глубокой древности волчок использовался многими народами для состязаний в искусстве его запуска. Но это были, главным образом, детские игры, распространенные в отдельных местностях, и не имевшие единых правил. В наше время даже по запуску волчков и продолжительности их вращения проводятся официальные соревнования, результаты которых фиксируются. Так, например, в Малайзии раз в году проходят официальные соревнования [14] на продолжительность вращения волчков. Рекорд в этом виде спорта равен одному часу сорока семи минутам. Столь высокая продолжительность вращения волчка говорит как о рациональности его формы, так и высоком качестве изготовления. На этих же ежегодных праздниках волчка проводится и ряд других состязаний не только по качеству их изготовления, но и по мастерству управления движением. В ходе одного из таких соревнований спортсмен выходит с волчком на площадку, на которой уже имеются четыре однотипных вращающихся волчка. Соревнующемуся предоставляется определенное время, в течение которого он должен привести свой волчок во вращение и производя по нему специальной клюшкой удары как по хоккейной шайбе сбить все четыре волчка. Чем быстрее будет решена поставленная задача или чем большее количество волчков (из четырех возможных) будет сбито, тем выше будет результат достигнутый спортсменом. Участие в описанном соревновании требует от соревнующегося высокой физической подготовки и серьезной тренировки.

## 58. Гироскоп позволяет человеку маневрировать в космосе

Увеличение сроков непрерывной работы космонавтов на околоземной орбите породило потребность выхода их в открытый космос. Последняя обусловливается необходимостью периодического контроля технического состояния как наружной поверхности корпуса корабля, так и расположенных на нем приборов и агрегатов, а также замены вышедших из строя и целесообразностью проведения других профилактических работ.

Естественно, что выполнение работ в космосе возможно лишь при наличии соответствующих опор, с помощью которых космонавт мог бы изменять свое положение в пространстве. С этой целью на корабле, как правило, оборудуются специальные скобы и поручни, и, кроме того, обеспечивается связь между кораблем и космонавтом. В настоящее время и для решения этой проблемы также предполагается использовать свойства вращающегося гироскопа [2].

Система состоит из четырех двустепенных гироскопов, принцип устройства которых уже был рассмотрен ранее (см. рис. 29). Указанные гироскопы, как показано на рис. 160, попарно установлены на специальных кронштейнах, закрепляемых на подошвах обуви космонавта. При этом два гироскопа, роторы которых вращаются вокруг продольной оси $Ox$ космонавта, закреп-

лены на его левой ноге. Эти гироскопы предназначены для управления его поворотами вокруг осей $Oy$ и $Oz$. Вторая пара приборов управляет вращением космонавта вокруг осей $Ox$ и $Oz$.

Для осуществления поворота вокруг требуемой оси корпус гироскопической системы снабжен контактными устройствами, включение которых производится посредством небольшого перемещения ног космонавта. Так, включив контакты $K_1$, создают моменты сил коррекции $M_1$, воздействующие на гироскоп $Г_1$ относительно его оси, параллельной $Oz$, либо в положительном,

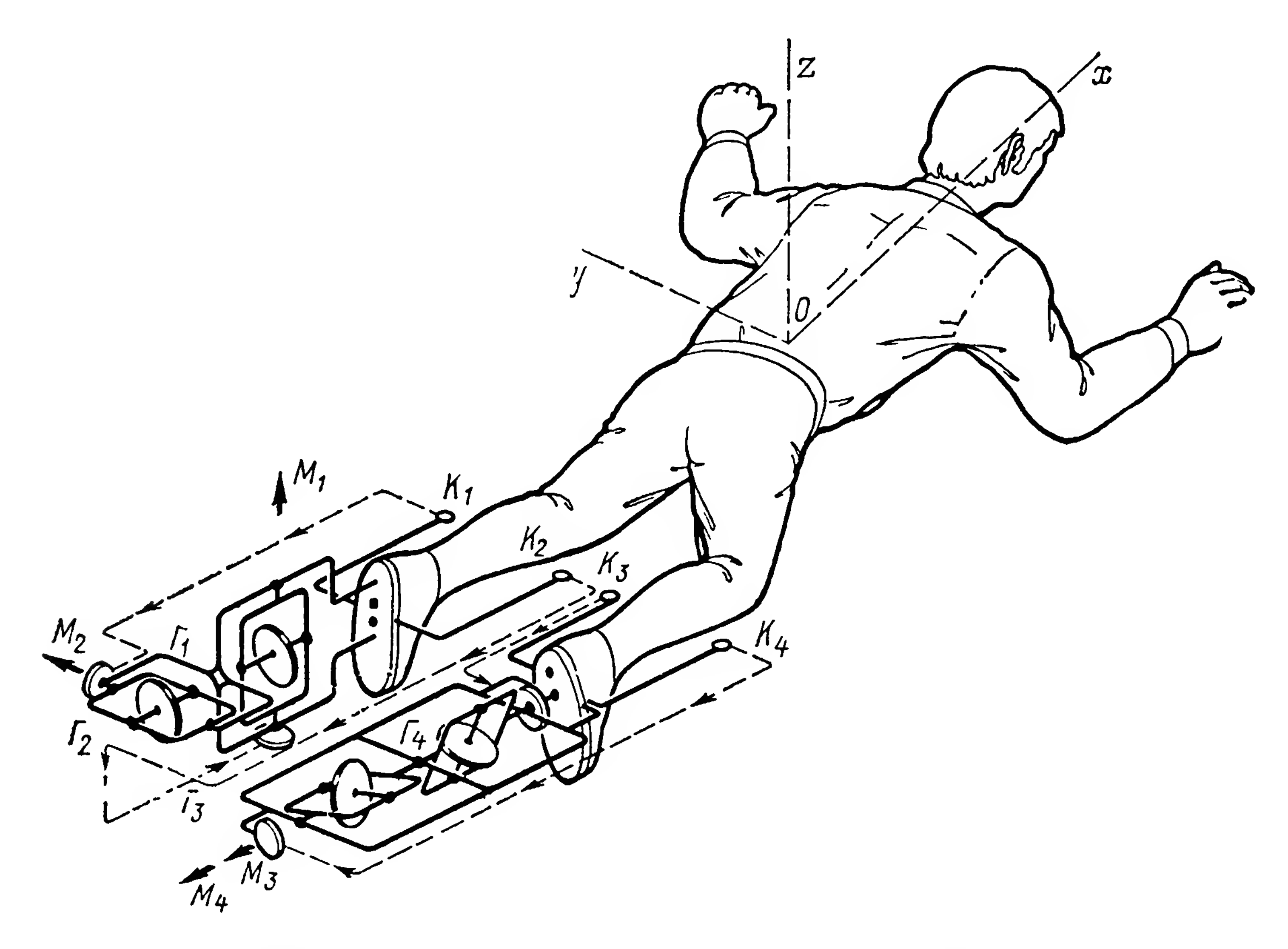



Рис. 160. Гироскопическое устройство для маневрирования человека в космосе

либо в отрицательном направлениях. Под действием момента $M_1$ у космонавта, который не испытывает сопротивления окружающей среды, в связи с чем все четыре гироскопа представляют собою системы с тремя степенями свободы, возникнет прецессионное движение вокруг оси $Oy$. При действии на гироскоп $Г_2$ момента $M_2$ космонавт будет поворачиваться вокруг оси $Oz$. В свою очередь, действуя моментом $M_3$ на гироскоп $Г_3$ (или моментом $M_4$ на гироскоп $Г_4$), космонавт будет производить поворот вокруг двух осей $Oy$ и $Oz$ одновременно. Гироскоп $Г_3$ обеспечивает основной момент, который порождает прецессию вокруг оси $Oz$, а гироскоп $Г_4$ — вокруг оси $Oy$. Нетрудно заметить, что описанное гироскопическое устройство, масса которого не превышает 6,3 кг, позволяет космонавту изменять свое положение в безвоздушном пространстве без участия рук, что значительно облегчает выполнение работ, связанных с профилактическими осмотрами или заменой аппаратуры, установленной на наружной поверхности космического корабля.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в книге примеры показывают, сколь велико значение гироскопического эффекта вращающихся масс во всей нашей жизни. Благодаря непрерывному вращению Земли происходит смена дня и ночи, времен года и постоянное изменение климата в отдельных районах. Гироскопический эффект способствует преобразованию рельефа берегов рек, порождает морские течения и ориентирует направления ветров. Он влияет на возникновения землетрясений, на перемещение в пространстве оси земного вращения и на многие другие явления природы.

Искусственные гироскопические устройства и приборы, созданные руками человека, имели большое значение для прогресса во многих областях деятельности. Так было при замене деревянных морских судов металлическими, при изучениях глубоко залегающих слоев Земли и колебаний пластов земной коры.

В наше время дальнейшему изучению поведения гироскопа уделяется все большее и большее внимание. Чем глубже будут изучены законы его движения, тем быстрее будут разгаданы исследователями многие загадки природы и тем в большей степени гироскопический эффект будет использован при создании человеком новых типов машин и орудий.

Гироскопический эффект уже позволил осуществить проекты многих интересных машин, создать сложнейшие навигационные системы и различные автоматические устройства. Он оказал свое влияние на запуск искусственных спутников Земли и на управление движением космических кораблей при межпланетных перелетах. Гироскоп был одним из основных навигационных приборов при достижении в 1977 г. советским ледоколом «Арктика», первым в истории человечества, Северного географического полюса.

Гироскоп применяется в наши дни как возбудитель и поглотитель гармонических колебаний, является основной частью многих технологических приспособлений, позволяющих автоматизировать трудоемкие производственные процессы. И еще многие насущные проблемы, стоящие перед землянами, предстоит разрешить с помощью гироскопических приборов и устройств,

# УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белькевич В., Венде Э., Виль-Вильямс И. Инженерное искусство природы. — Техника — молодежи, 1962, № 9, с. 37.

2. Беляков И. Т., Борисов Ю. Д. Технология в космосе. М., Машиностроение, 1974.

3. Берг А., Сотсков Б. Бионика. Состояние и тенденции развития. — Наука и жизнь, 1966, № 6, с. 2.

4. Богданович М. М., Ильин П. А. Гироскопические приборы и устройства. Л., Судпромгиз, 1961.

5. Брозгуль Л. И., Смирнов Е. Л. Вибрационные гироскопы. М., Машиностроение, 1970.

6. Волчок и землетрясения. — Знание — сила, 1974, № 8, с. 41.

7. Гаспарянц Г. А. Устойчивость и управляемость автомобиля. М., Автотрансиздат, 1955.

8. Гироскоп для отделения сливок. — Изобретатель и рационализатор, 1973, № 1, с. 10.

9. Данилин В. П. Гироскопические приборы. М., Высшая школа, 1965.

10. Дмитриев И. С., Есаулов С. Ю. Системы управления одновинтовых вертолетов. М., Машиностроение, 1969.

11. Долятовский В. А., Пономарев И. Д. От живых организмов к автоматам. Киев, Наукова думка, 1967.

12. Елеонская Е. Предки современных игрушек. — Игрушка, 1939, № 8, с. 43.

13. Зарафянц М. Т. Что такое энтропия. Киев — Харьков, Гостехиздат УССР, 1935.

14. Как сбить волчок. — Вокруг света, 1978, № 3, с. 78.

15. Келдыш М. В. Шимми передних колес трехколесного шасси. — Труды ЦАГИ, 1945, № 564, с. 1.

16. Келдыш М. В. Ленин и наука. — Правда, 1970, № 93.

17. Кирпичев В. Л. Беседы о механике. М., Гостехтеориздат, 1933.

18. Ковалев В., Ошанин С. Полет насекомых. — Наука и жизнь, 1965, № 8, с. 97.

19. Когда Луна — в перигее. Гипотеза советского ученого. — Известия, 1976, № 286.

20. Колчин Б. А. Новгородские древности. Резное дерево. М., Наука, 1971.

21. Консультационный пункт. — Семья и школа, 1969, № 9, с. 28.

22. Косырев Е. Танк вчера, сегодня, завтра. — Наука и жизнь, 1968, № 5, с. 39.

23. Котовский В. И. Стабилизаторы танкового вооружения. М., Воениздат, 1961.

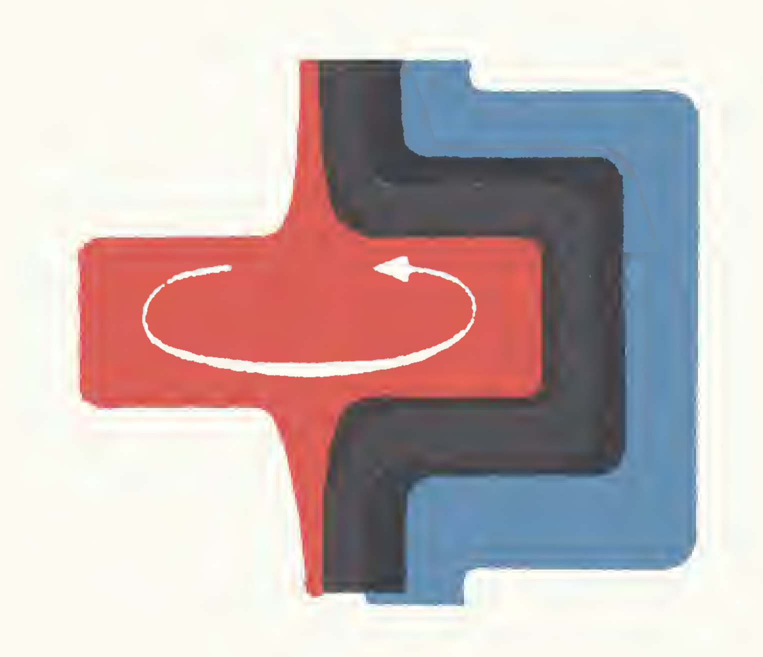
24. Крылов А. Н., Крутков Ю. А. Общая теория гироскопов и некоторых технических их применений. Л., АН СССР, 1932.

25. Кудревич Б. И. Элементарная теория и практика гироскопического компаса. Часть I. Петроград, ГИЗ, 1921.
26. Магнус Р. Установка тела. АН СССР, 1962.
27. Майоров С А., Сломянский Г. А. О гироскопическом эффекте при верчении шариков в шарикоподшипнике. — Известия АН СССР, ОТН, 1958, № 2, с. 58.
28. Малеев П. И Новые типы гироскопов. Л., Судостроение, 1971.
29. Орлова Е. Н. Юрацкие игрушки. — Сибирская живая старина, 1926, № 1(5), с. 145.
30. Павлов В. А., Понырко С. А., Хованский Ю. М. Стабилизация летательных аппаратов и автопилоты. М., Высшая школа, 1964.
31. Павлов И. В. О возможности автоматического определения географических координат подвижных платформ. — Труды ЛИАП, 1959, вып. 28, с. 42.
32. Перри Дж. Вращающийся волчок. Вологда, Северный печатник, 1926.
33. Пикуль В. Волчок дрейфует во льдах. — Изобретатель и рационализатор, 1978, № 9, с. 20.
34. Покровский Е. А. Детские игры, преимущественно русские. М., 1887 (Общество любителей естествознания, антропологии и этнографии).
35. Потапов Р. Ориентация и навигация у птиц. — Наука и жизнь, 1966, № 9, с. 62.
36. Почему Земля трясется? — Наука и жизнь, 1969, № 7, с. 103.
37. Почему я левша? — Работница, 1968, № 7, с. 18.
38. Проблемы гироскопии. М., Мир, 1967, с. 129.
39. Проект однорельсовой гироскопической железной дороги Петроград — Гатчина. Петроград, ВСНХ, 1922.
40. Романов Е. Р. Быт белоруса. Белорусский сборник. Вып 8, Вильна, 1912, с. 587.
41. Рыбалтовский Н. Ю., Поникоровский Г. Н., Дорофеев И. Т. Основы кораблевождения. М., Воениздат, 1954.
42. Сборник материалов для описания местностей и племен Кавказа. Тифлис, 1886. (Издание Управления кавказского учебного округа. Вып. 5), с. 233.
43. Сифф Э. Дж., Эммерич К. Л. Введение в гироскопию. М., Машиностроение, 1965.
44. Слепков В. С. Таймерная модель вертолета «Ленинград». — Юный моделист-конструктор, 1965, № 13, с. 8.
45. Смородинский Я. Волчок-акробат. — Наука и жизнь, 1969, № 7, с. 76.
46. Терещенко А. Быт русского народа. Часть IV. Спб, 1848.
47. Титов Г. С. Голубая моя планета. — Роман-газета, Художественная литература, 1972, № 24.
48. Ферри Э. С. Прикладная гидродинамика. М., ОНТИ, 1936.
49. Фещенко И. С. Без слез... — Изобретатель и рационализатор, 1973, № 1, с. 10.
50. Физическое воспитание детей у разных народов, преимущественно России. М., 1884 (Общество любителей естествознания, антропологии и этнографии, т. XLV, вып. 3), с. 313.
51. Хватцев М. Е. В защиту левшей. — Здоровье, 1968, № 5, с. 10.
52. Хилов К. Л. Функция органа равновесия и болезнь передвижения. Л., Медицина, 1969.
53. Цандер Ф. А. Проблемы полета при помощи реактивных аппаратов. Межпланетные полеты. М., Оборонгиз, 1961.
54. Чертков В. Свершилось. — Правда, 1977, 20 авг,

## ОГЛАВЛЕНИЕ

30 коп.

# гироскопический эффект, его проявления и использование



Гироскопические устройства в настоящее время — основные элементы систем управления морскими судами, самолетами, космическими кораблями, планетоходами и другими подвижными объектами. Гироскоп помог уменьшить качку судна при волнении на море и автомобиля при езде по неровной дороге. Использование гироскопического эффекта обеспечивает устойчивое движение велосипедов, мотоциклов и мотороллеров, позволило осуществить проект монорельсовой железной дороги, создать двухколесный автомобиль и даже одноколесный мотоцикл. Гироскопические стабилизаторы биноклей, фотоаппаратов и кинокамер дают возможность наблюдать за удаленными предметами и фотографировать их при установке аппаратуры на колеблющихся в процессе движения платформах.

Многообразие возможностей практического использования гироскопов для решения самых разнообразных народнохозяйственных задач привлекает к ним всевозрастающее внимание молодежи.